Formation Doctorale Musique et Musicologie du XX^e siècle

Université Paris-Sorbonne (Paris IV)

Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales

Hans TUTSCHKU

MEMOIRE

Pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies

L'application des paramètres compositionnels au traitement sonore

Sous la direction de Hugues Dufourt et Marc Battier

Suivi de la traduction de : Julia Gerlach - « Aus der Ferne : Ernst Kreneks Elektronisches Musikprojekt » (« Venu de loin : le Projet Musical électronique d'Ernst Krenek ») in *Musik ..., verwandelt. Das Elektronische Studio der TU Berlin 1953-1995*, Wolke, Berlin, 1996, pp. 73-83.

Septembre 1999

Je tiens à remercier Messieurs les Professeurs Hugues Dufourt et Marc Battier pour m’avoir permis de mener à bien ce travail ainsi que Carlos Agon Amado, Gérard Assayag, Jacobo Baboni-Schilingi, Fabien Levy, Mikhail Malt et Frederic Voisin pour leurs conseils scientifiques.

Je tiens enfin à remercier tout particulièrement Sylvie Goursaud pour ses conseils et son aide précieuse.

A mes parents

Ce travail retrace l'évolution de différentes méthodes compositionnelles utilisées dès le début de ce siècle pour travailler avec les sons stockés sur support, tout en étudiant le rapport entre les paramètres compositionnels et leur application au traitement sonore. Une étude détaillée de quelques aspects de *Studie I* de Karlheinz Stockhausen et de *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey permet de se pencher sur une approche structurante d'un côté et de l'autre d'une méthode partant des analyses de données acoustiques. Dans la dernière partie applicative, nous présentons enfin une bibliothèque de fonctions qui s'intègre dans le logiciel *OpenMusic* et qui offre la possibilité d'établir un lien entre l'écriture formalisée rendue possible par la composition assistée par ordinateur et le traitement sonore réalisé avec *AudioSculpt*. Ainsi, il devient possible dans les pièces mixtes de développer un lien intrinsèque entre écriture instrumentale et partie électroacoustique.

This study retraces the evolution of various compositional methods since composers of this century got used to work with recorded sounds; it also shows the relationship between the compositional parameters and their use during the sound treatment. By analysing some aspects of *Studie I* by Karlheinz Stockhausen and *Mortuos Plango, Vivos Voco* by Jonathan Harvey, we will study two different compositional approaches: a structural approach on the one side and an analysing one on the other side. In the last part of this study, we present a library of functions which works as a part of the program *OpenMusic* and which offers possibilities for controlling sound treatments by formulised compositional processes. With this method it is possible in mixed pieces to achieve an intrisic link between the instrumental writing and the electroacoustic part.

Table des matières

Introduction **3**

1. Historique **7**

1.1 Introduction des bruits et des moyens de production sonore électroniques dans la musique 8

1.2 La « musique concrète » 19

1.3 La « musique électronique » 28

1.4 Influence réciproque des différentes techniques et conceptions 35

1.5 V*oltage control*, ordinateur et contrôle des paramètres compositionnels 42

2. Analyse des paramètres compositionnels dans deux œuvres du répertoire **47**

2.1 *Studie 1* de Karlheinz Stockhausen 47

2.2 *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey 51

3. Application informatique : la bibliothèque « OpenMusic - AudioSculpt » **61**

3.1 Le traitement sonore 65
3.1.1 Le vocodeur de phase 65
3.1.2 Le logiciel AudioSculpt 66
3.1.3 Quelques opérations courantes d'analyse sonore utilisant AudioSculpt 67
3.1.4 Quelques opérations courantes de traitement sonore utilisant AudioSculpt 69

3.2 La bibliothèque « OpenMusic — AudioSculpt » 73
3.2.1 Le lien entre la formalisation des hauteurs et la transposition d'un son 74
3.2.1.1 La transposition par mélodie 74
3.2.1.2 L'effacement de l'évolution mélodique d'un son 79
3.2.1.3 La génération du vibrato 80
3.2.2 Le lien entre la formalisation des hauteurs et le traitement du specte par filtrage 83
3.2.2.1 L'application d'une mélodie au filtre 83
3.2.2.2 Le contrôle du filtre par l'évolution de la fréquence fondamentale 87
3.2.2.3 Le contrôle du filtre par une séquence rythmique 91
3.2.2.4 L'utilisation de l'analyse des partiels pour contrôler un filtre 97
3.2.3 La formalisation de la durée d'un son 101

3.3 Exemple d'application des paramètres de filtrage dans la pièce *Sculpted Implotion* de Ketty Nez 106

3.4 Exemple d'application des paramètres de transposition dans notre pièce *Sieben Stufen* 114

4. Conclusion **119**

5. Bibliographie **122**

5.1 Livres et journaux 122

5.2 Quelques références Internet 135

6. Index **137**

7. Annexe 1 — CDRom des exemples sonores **140**

8. Annexe 2 — Liste complète des fonctions de la bibliothèque « OpenMusic - AudioSculpt » **143**

9. Traduction de : Julia Gerlach - « Aus der Ferne : Ernst Kreneks Elektronisches Musikprojekt » « Venu de loin : le Projet Musical électronique d'Ernst Krenek » **145**

Introduction

L'introduction des bruits dans la musique au cours de ce siècle marque le développement de nouveaux modes de composition à partir de ce matériau sonore inédit. Grâce d'une part aux possibilités de stockage des sons offertes par des supports comme le disque, la bande magnétique ou la mémoire de l'ordinateur, et d'autre part aux moyens techniques de manipulation et du traitement sonore de ces sons stockés, le travail compositionnel utilisant des sons et des bruits gagne en importance. Une branche autonome se développe : la « musique électroacoustique ». Ce terme ne définit pas un courant esthétique mais caractérise la musique stockée sur un support, qui regroupe des tentatives inégales et disparates malgré une certaine identité de moyens de production.

Le travail avec les sons stockés sur un support et davantage encore l'arrivée de l'ordinateur ont poussé les compositeurs à faire évoluer leurs méthodes de travail et modes de pensée, et les ont amenés à emprunter un nombre de termes croissants au langage technique et scientifique. Le travail compositionnel en effet est de plus en plus lié à la manipulation de machines, qui au fur et à mesure de leur développement permettent aux compositeurs d'acquérir une maîtrise des phénomènes sonores qui ne cesse de gagner à la fois en ampleur et en précision. Le travail avec les machines et notamment avec l'ordinateur exige une formalisation, une abstraction et une modélisation des pensées musicales en unités symboliques qui puissent être maniées au sein de ces systèmes. Ces unités symboliques n'ont cessé d'évoluer au cours de ce siècle, les progrès techniques permettant de contrôler et de manipuler le son par le biais de critères toujours plus nombreux et précis. La notion de « paramètre compositionnel », employée ici pour désigner ces éléments de contrôle du sonore, est donc aussi fondamentale que changeante au cours de ce siècle - autrement dit, les compositeurs ont été amenés à travailler avec un nombre croissant de « paramètres compositionnels » constamment redéfinis du fait de l'évolution technique et scientifique.

Ce n'est cependant pas là la seule raison pour laquelle ce terme essentiel de « paramètres compositionnels » est si difficile à cerner. En effet, si le travail avec les machines nécessite une sorte d'uniformisation du vocabulaire qui permet l'échange des idées, cela ne mène pas pour autant à une uniformisation des méthodes employées par les différents compositeurs. En effet, ces évolutions techniques ont poussé les compositeurs non seulement à réfléchir sur les outils employés, mais aussi sur l'intégration de ces outils dans leur propre langage. Chaque compositeur, selon sa personalité, son école et ses préoccupations du moment, s'intéresse en priorité à certains paramètres compositionnels qu'il va développer au sein d'une œuvre, laissant d'autres paramètres possibles en dehors de son champ de travail. Il est donc impossible de définir un contenu de ce terme applicable à tout le monde.

Si définir les paramètres compositionnels employés est une étape importante dans le processus de composition, il ne s'agit cependant que d'éléments qui sont ensuite manipulés lors du traitement sonore. Par le terme de traitement sonore, nous entendons une manipulation technique du son menant à un changement d'identité sur le plan temporel et/ou spectral. Il y a des transformations continues dont les paramètres évoluent dans le temps, et il y a des traitements fixes dont les paramètres ne changent pas en cours de traitement. Pour pouvoir définir une transformation, il faut se demander quel paramètre sera altéré. Nous nous limiterons dans ce travail à l'étude de l'altération du contenu spectral à l'aide de filtres, de la hauteur à l'aide de la transposition, et de la structure temporelle d'un son grâce à la dilatation/compression.

Le but de cette étude sera d'essayer de développer quelques méthodes de contrôle du traitement sonore grâce à la formalisation de processus rendue possible par la composition assistée par ordinateur. Nous nous limiterons ici aux traitements en temps différé, c'est-à-dire calculés à l'aide d'un ordinateur dans le studio. Toutes les possibilités de transformations sonores durant le concert, en temps réel, ne rentrent pas dans notre étude.

Notre travail sera divisé en trois parties : une première partie historique tentera de rappeler comment le traitement sonore d'une part et la formalisation des processus compositionnels d'autre part se sont développés au cours du XXe siècle. De très nombreuses tendances différentes ayant vu le jour, il nous sera ici impossible de prétendre retracer le développement de ces conceptions musicales de façon exhaustive. Nous en présenterons cependant un certain nombre et nous intéresserons plus particulièrement à deux grands courants, la musique concrète et la musique électronique.

Une seconde partie analytique sera ensuite l'occasion d'étudier plus en détail quelques conceptions et méthodes de travail concernant les paramètres compositionnels et leur traitement dans deux œuvres majeures du répertoire, *Studie I* de Karlheinz Stockhausen, et *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey.

Une troisième partie permettra enfin de développer un ensemble d'outils informatiques pour faire le pont entre les deux domaines de la formalisation et du traitement sonore. Un tel contrôle se fait habituellement en usant d'une quantité considérable de paramètres pour pouvoir décrire l'évolution du traitement dans le temps. Ces paramètres se présentent souvent sous forme de très longues listes de chiffres, difficiles à lire et manipuler. Pour répondre à cette difficulté, une bibliothèque de fonctions pour *OpenMusic*, logiciel de Composition Assistée par Ordinateur (CAO), a été développée par l'auteur pour faire le lien avec *AudioSculpt*, logiciel d'analyse et de traitement sonore. La gestion des lourdes données de contrôle est laissée au système informatique, donnant au musicien la possibilité de travailler avec des signes musicaux comme la note, le rythme et la dynamique — dont les valeurs sont appliquées aux sons et aux bruits. Pour clore la partie applicative, nous étudierons enfin l'utilisation de quelques fonctions de la bibliothèque dans deux œuvres récentes, la pièce mixte *Sculpted Implosion* de la compositrice américaine Ketty Nez et la pièce pour bande *Sieben Stufen* de l'auteur.

Mettre ainsi en relation la formalisation des paramètres rendue possibles par la composition assistée par ordinateur et les fonctions de traitement sonore permet non seulement d'appliquer ces processus dans les œuvres pour bande seule, mais également d'ouvrir de nouvelles voies pour les pièces mixtes. Il devient en effet possible d'user facilement des mêmes paramètres compositionnels pour l'écriture instrumentale et le traitement sonore, créant ainsi un rapport particulièrement étroit entre ces deux domaines.

1. Historique

Avec l'arrivée de l'électricité à la fin du XIXe siècle apparaissent les premiers instruments musicaux utilisant cette source d'énergie. Nous ne citerons ici que quelques instruments importants comme le *Telharmonium* (Thaddeus Cahill, 1896), le *thereminvox* (Léon Termen, 1920), *les ondes Martenot* (Maurice Martenot, 1928) et le *Trautonium* (Friedrich Trautwein, 1930). Même si ces nouveaux instruments sont conçus pour créer des sonorités inouïes, leur utilisation musicale reste alors semblable à celle des instruments traditionnels.

L'autre innovation importante est le *phonographe*. Inventé en 1877 et en France par Charles Cros et aux États-Unis par Thomas Edison, il permet un enregistrement mécanique. Son utilisation ne se limite pas à la reproduction de concerts enregistrés ou de pièces de théâtre par exemple, mais il devient un outil de composition, voire un instrument musical. Les sons utilisables par un compositeur dépassent les limites traditionnelles - gamme des instruments et voix. L'enregistrement et la reproduction sonore sont à l'origine d'un nouveau rapport entre matériau sonore et composition ainsi que d'un profond changement dans les méthodes compositionnelles.

C'est avec l'apparition du tourne-disque, du magnétophone, du synthétiseur, des appareils de traitement analogique, et surtout de l'ordinateur, qu'une réflexion approfondie sur l'intégration de ces outils dans les méthodes compositionnelles devient nécessaire.

Afin d'analyser de quelles façons diverses techniques de traitement sonore sont aujourd'hui utilisées par les compositeurs, nous allons tout d'abord étudier comment ces derniers ont cherché à élargir la palette sonore depuis le début de ce siècle, et comment ces nouveaux sons s'intègrent dans leurs méthodes de composition. Ces exemples historiques ne présentent pas tous au sens strict du terme des techniques de « traitement » sonore, mais il nous semble indispensable dans cette première partie de notre travail de retracer le développement des pensées compositionnelles par rapport aux bruits et sons stockés sur support.

Nous nous concentrerons ensuite sur deux tendances divergentes : la « musique concrète » d'une part, inventée en 1949 par Pierre Schaeffer, à la recherche d'une approche empirique de la matière sonore, toujours guidé par l'écoute, et la « musique électronique » produite à partir de 1951 à Cologne d'autre part, dont la démarche est au contraire très formalisée. Pour réaliser leurs concepts radicaux du contrôle total sur le timbre, les compositeurs du studio de Cologne renoncent au départ à l'utilisation des sons enregistrés et créent des sons synthétiques en superposant des composants spectraux. Même si cette approche n'est pas un « traitement sonore » au sens strict du terme, il est très important d'expliciter leurs concepts compositionnels, car ils influencent par la suite les méthodes de travail sur le son. De plus, dès 1955, Karlheinz Stockhausen introduit des sons vocaux dans sa composition *Gesang der Jünglinge*[1] et les combine avec des sons de synthèse.

Nous verrons pour finir comment la délimitation de concepts stricts se perd au fur et à mesure que l'on avance dans les années cinquante et soixante. Enfin, l'arrivée du *voltage control*, commande en tension des paramètres d'un équipement électronique, puis de l'ordinateur, ouvrent deux nouvelles voies : une formalisation très précise des processus compositionnels devient possible alors que dans le même temps, de nouvelles méthodes de traitement sonore se développent.

1.1 Introduction des bruits et des moyens de production sonore électroniques dans la musique

> « La raison pour laquelle les bruits ne devaient pas être utilisés dans notre musique occidentale tient au développement de la polyphonie. Car seuls des intervalles et accords exactement mesurables permettent de contrôler la polyphonie sur le plan harmonique. Pour pouvoir entendre précisément des intervalles, des sons avec des vibrations périodiques sont nécessaires, les bruits ne sont donc pas utilisables. La hauteur des bruits ne permet de les définir que de façon approximative. La musique extra-européenne — la musique japonaise, africaine ou sud-américaine par exemple — pouvait toujours bien entendu utiliser largement

[1] *Chant des adolescents.*

> les bruits avec une grande richesse, car c'était une musique monodique ou hétérophonique[2] »

Les événements sonores sans hauteur précise s'intègrent dans l'orchestre traditionnel grâce aux percussions. Au XVIIIe siècle, Mozart par exemple utilise la grosse caisse, des triangles et des cymbales dans l'opera *Die Entführung aus dem Serail*. Au XIXe siècle, la caisse claire devient un instrument caractéristique de la musique militaire, tandis que les gongs et les tam-tams sont utilisés pour évoquer des atmosphères sombres et mystérieuses. Les percussions sont à cette époque plutôt employées comme « accompagnement musical », d'une façon illustrative, du fait de leur qualité compositionnelle spécifique, différente des sons instrumentaux à hauteur définie.

Un des premiers artistes à imaginer une possible création artistique utilisant le phonographe est le poète français Guillaume Apollinaire vers 1912. Il espère utiliser cette technique pour dépasser les possibilités expressives naturelles de la voix et les élargir. Il prévoie même de ne pas utiliser uniquement la voix pour mettre en scène la poésie, mais de mêler les sons vocaux avec des bruits [DÖHL, 1996, n.p.].

Les Futuristes italiens réclament également une intégration programmatique des bruits dans la musique. Le compositeur Francesco Balilla Pratella déclare les notions de consonance et de dissonance inexistantes, et proclame l'avènement d'une musique polyrythmique et inharmonique, comportant des micro-intervalles et mettant fin au système diatonique [PRATELLA, 1973, pp. 307-311].

Encore plus conséquent, le peintre Luigi Russolo s'adresse le 11 mars 1913 au musicien F. Balilla Pratella dans son manifeste futuriste « L'art des bruits » et lui propose d'adopter ses idées pour « la rénovation de la musique par l'Art des Bruits. »

---

[2] C'est nous qui traduisons. Texte original : "*Der Grund dafür, daß in unserer westlichen Musik keine Geräusche verwendet werden durften, liegt in der Entwicklung der Polyphonie. Denn Polyphonie kann man nur harmonisch kontrollieren bei exakt meßbaren Intervallen und Akkorden. Um Intervalle genau hören zu können, braucht man Töne mit periodischen Schwingungen ; man kann also keine Geräusche gebrauchen. Geräusche sind nur approximativ in ihren Tonhöhen difinierbar. Deshalb konnte außereuropäische Musik - zum Beispiel die japanische oder afrikanische oder südamerikanische -selbstverständlich die Geräusche nach wie vor in reichem Maße benutzen ; denn sie war ja eine einstimmige Musik beziehungsweise eine heterophone.*" [STOCKHAUSEN, 1978, p.392]

> « L'art musical rechercha tout d'abord la pureté limpide et douce du son. Puis il amalgama des sons différents, en se préoccupant de caresser les oreilles par des harmonies suaves. Aujourd'hui, l'art musical recherche les amalgames de sons les plus dissonants, les plus étranges et les plus stridents. Nous nous approchons ainsi du *son-bruit.* […] L'oreille d'un homme du dix-huitième siècle n'aurait jamais supporté l'intensité discordante de certains accords produits par nos orchestres (triplés quant au nombre des exécutants) ; notre oreille au contraire s'en réjouit, habituée qu'elle est par la vie moderne, riche en bruits de toute sorte. […] Beethoven et Wagner ont délicieusement secoué notre cœur durant bien des années. Nous en sommes rassasiés. *C'est pourquoi nous prenons infiniment plus de plaisir à combiner idéalement des bruits de tramways, d'autos, de voitures et de foules criardes qu'à écouter encore, par exemple, l' »Héroïque » ou la « Pastorale ».* […] Pour vous convaincre de la variété surprenante des bruits, je vous citerai le tonnerre, le vent, les cascades, les fleuves, les ruisseaux, les feuilles, le trot d'un cheval qui s'éloigne, les sursauts d'un chariot sur le pavé, la respiration solennelle et blanche d'une ville nocturne, tous les bruits que font les félins et les animaux domestiques et tous ceux que la bouche de l'homme peut faire sans parler ni chanter. […] Nous nous amuserons à orchestrer idéalement les portes à coulisses des magasins, le brouhaha des foules, les tintamarres différents des gares, des forges, des filatures, des imprimeries, des usines électriques et des chemins de fer souterrains. Il ne faut pas oublier les bruits absolument nouveau de la guerre moderne[3]. »

Plus loin il va jusqu'à imaginer de quelles façons de nouveaux instruments pourraient être conçus pour « traiter » les sons.

> « Chaque bruit a un ton, parfois aussi un accord qui domine sur l'ensemble de ces vibrations irrégulières. [...] Certains bruits obtenus par un mouvement rotatoire peuvent nous offrir une gamme entière, ascendante ou descendante, soit qu'on augmente, soit qu'on diminue la vitesse du mouvement[4]. »

Il est très clair alors que Russolo pense à utiliser les bruits comme les éléments traditionnels d'une mélodie, car il conçoit la possibilité de transpositions. Il remplace les sons instrumentaux habituels par des bruits et cherche à les organiser selon des critères musicaux traditionnels.

[3] [RUSSOLO, 1973, p. 312-314]. Nous avons respecté les particularités typographiques (italiques) du texte original.
[4] [RUSSOLO, 1973, p. 315]

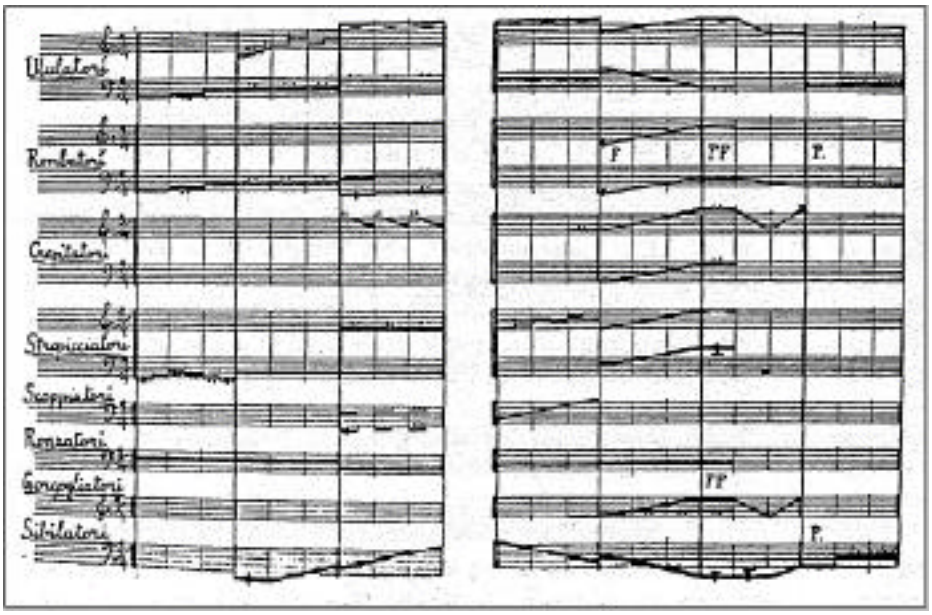


Fig. 1.1 Partition de *Reveil de Capitale* de L. Russolo, executé durant le concert du 11 août 1913 sur les instruments *intonarumori*.[5]

Disposer du plus large éventail possible de modes de production sonore et insister sur l'unité du phénomène acoustique l'intéressait davantage que de produire des sons inouïs [BOSSEUR, 1993, p. 22]. Les futuristes russes, notamment Dziga Vertov en 1917, utilisent déjà les moyens d'enregistrement de l'époque pour créer leurs sons inédits.

Les futuristes italiens donnent des concerts entre autre à Milan, Gênes, Londres, Dublin, Vienne, Moscou et Berlin sur les instruments *intonarumori* [6] que Russolo avait construit avec Ugo Piati. Même si leurs concerts déclenchent à l'époque de vives réactions dans le public et la presse, leurs recherches n'ont guère influencé la suite de l'évolution musicale. La contradiction intrinsèque entre d'une part les nouveaux matériaux utilisés et d'autre part la technique traditionnelle de composition employée, ainsi que l'absence de séparation nette entre musique et bruits, furent des obstacles à la création d'une musique ayant un impact décisif au-delà de quelques scandales. [GRONEMEYER, 1988, p. 45].

[5] Illustration dans [GRONEMEYER, 1988, p. 45]
[6] ''intonation-rumeur''

Les possibilités techniques d'enregistrement et de retransmission offertes par le gramophone ouvrent deux voies artistiques promises à un grand avenir.

Quelques compositeurs commencent très vite à utiliser des sons enregistrés dans leurs pièces, Ottorino Respighi par exemple. Il se sert en 1924 d'un chant de rossignol dans sa pièce orchestrale *Pins de Rome* et George Antheil incorpore en 1926 le son d'un moteur d'avion dans son *Ballet Mécanique* [CHADABE, 1997, p. 23]. Mais ces sons servent d'illustration. Ils ne sont pas en eux-mêmes des créations originales, il n'y a pas de traitement sonore. Il n'y a pas non plus alors de théorie compositionnelle développée pour intégrer ces bruits dans un ensemble cohérent.

L'autre voie d'expérimentation ouverte consiste à jouer avec le support sonore lui-même. Le peintre hongrois Laszlo Moholy Nagy, professeur à l'école du Bauhaus fondée en 1919 par Walter Gropius à Weimar, s'intéresse également à la musique et fait de nombreuses expérimentations durant les années vingt en appliquant des gravures mécaniques sur des disques. C'est un des premiers exemples d'un outil de reproduction sonore détourné pour créer de nouvelles sonorités. [PASSUTH, 1982, p. 308-309]

Toujours en Allemagne dans les années vingt, le peintre et cinéaste Walter Ruttmann utilise un autre support pour la création sonore : le film. Le résultat est la célèbre pièce *Wochenende*[7] produite en 1930. Elle ne présente aucune image et utilise uniquement la piste son du film. W. Ruttmann avait déjà réalisé des films expérimentaux comme *Berlin — Symphonie einer Großstadt* en 1927. Dans *Wochenende,* il utilise les mêmes méthodes de coupure et de montage que dans ses films. Cette première pièce de « musique concrète », réalisée vingt ans avant les inventions de Pierre Schaeffer, est un « collage » de sons enregistrés évoquant les bruits d'un week-end en ville. W. Ruttmann exploite déjà de nombreuses méthodes compositionnelles caractèristiques du traitement des sons stockés sur support, notamment le montage de courts fragments sonores, technique qui va devenir très importante après l'apparition des

[7] "week-end".

magnétophones[8].

À cette époque, la piste sonore n'était pas encore magnétique, mais optique. Le noir de la bobine du film pouvait être plus ou moins intense. Ces variations d'intensité étaient décodées et traduites en impulsions sonores. Oskar Fischinger utilise également ce support en dessinant directement sur le film pour créer des phénomènes sonores abstraits. Il utilise le terme « musique synthétique » pour désigner ses créations [RUSCHKOWSKI, 1998, p. 79-81].

A la même époque, E. Varèse ne s'intéresse pas non plus aux bruits de la vie quotidienne, mais à ceux pouvant être exécutés sur des instruments. Il est à la recherche d'instruments pouvant répondre à ses idées et permettre l'épanouissement de nouvelles sonorités. C'est pour cette raison qu'il choisit les percussions pour la pièce *Ionisation* composée de 1929 à 1931 pour 36 percussions tenues par 13 musiciens. Cette pièce marque l'émancipation de la percussion. Pour E. Varèse, ce n'est pas une pièce de bruits mais une composition de timbres — ce qui ne l'empêche pas de parler à ce propos de « son organisé » [GRONEMEYER, 1988, p. 46].

K. Stockhausen considère la composition *Ionisation* comme un point de référence important dans le processus d'intégration des bruits dans la musique occidentale. Parce qu'il n'y a pas de sons harmoniques, on l'écoute avec « d'autres oreilles ». Les qualificatifs « consonant » et « dissonant » ont perdu leur sens, et notre attention se porte plutôt vers le rythme [STOCKHAUSEN, 1963b, pp. 32-33].

La rupture avec le système harmonique et ses règles intervalliques a donc permis d'introduire de plus en plus les bruits dans la musique. E. Varèse a dissous la différence entre son et bruit tout en cherchant toujours à former et à sculpter ces sons-bruits selon les règles de sa propre imagination.

[8] Le premier magnétophone est produit en 1934 par la firme allemande AEG; il est commercialisé en 1937 par AEG/Telefunken [RUSCHKOWSKI, 1998, p. 188-189].

John Cage au contraire voulait libérer les sons de quelque contrôle que ce soit. Cette idée l'amena également à s'intéresser aux percussions, au sens large du terme. Il s'intéresse aux objets de toute provenance, tape dessus pour découvrir leurs sonorités et écrit des pièces sans choisir définitivement les instruments avec lesquels elles devoivent être exécutées. *Living Room Music* par exemple est une composition de 1940 pour « percussions que l'on trouve dans un salon »[9].

Même si J. Cage n'est pas le premier à utiliser le piano préparé, on lui accorde souvent l'image « d'inventeur »[10]. J. Cage se souvenait de son professeur Henry Cowell, qui avait déjà expérimenté de nouvelles sonorités avec des assiettes posées sur les cordes du piano et qui avait inventé le *cluster*. J. Cage développe à partir de là ses propres préparations avec des bouchons, vis, boulons et pièces de caoutchouc. Décrivant par exemple la préparation requise pour sa pièce *Music festival for two prepared pianos*, il demande entre autre qu'une pièce de caoutchouc soit insérée entre les cordes du « mi 2 »[11], une vis en métal, entre les cordes du « do 1 », alors que le « fa# 3 » doit être étouffé avec un bouchon.

Selon K. Stockhausen, l'invention du piano préparé est le jalon le plus important sur le chemin menant aux compositions de timbres. Le compositeur choisit des sonorités propres à chaque œuvre mais en utilisant d'autres ressources que celles offertes par les instruments d'une orchestration traditionnelle.

> « … Pour chaque pièce, chaque partie, Cage compose […] des sons, il les prépare. […] Le timbre est donc beaucoup plus fortement lié au processus formel que jusqu'alors. Chaque préparation exige son propre temps d'attaque et de résonance ; […] Le rythme et l'organisation de la dynamique d'une telle composition et de ses parties vont donc être différents du seul fait de ces préparations[12]. »

---

9 John Cage - *Living room music, for percussion and speech quartet*, Edition Peters, New York, 1976.

10 Dès 1914 Erik Satie avait placé du papier dans le piano pour en transformer le son [LISTA, 1973, p. 305]

11 La désignation des octaves suit ici le système français, où le "la" 440 Hz fait partie de l'octave n° 3

12 C'est nous qui traduisons. Texte original : " *… vielmehr komponiert Cage die Klänge eigens für jedes Stück und seine Teile, er 'präpariert' sie. […] Die Klangfarbe ist also in viel größerem Maße als bisher am Formprozeß beteiligt. Bestimmte Präparationen verlangen eine ganz bestimmte Dauer des Anschlages und Klingenlassens ; […] Also wird auch die Rhythmik und die Lautsstärkeordnung für eine solche Komposition und ihrer Teilstrukturen schon allein durch die Präparationen verschieden sein."* [STOCKHAUSEN,1963b, p.34]

Ce sur quoi Stockhausen met avant tout l'acccent dans le travail de Cage, c'est la composition de timbres. Il s'intéresse moins à la recherche de nouvelles sonorités en soi et pour soi qu'à leur intégration compositionnelle dans la structure de la pièce.

L'invention du piano préparé peut être considérée comme un premier pas vers l'échantillonneur. Une touche précise du clavier n'est plus utilisée pour produire une note avec une hauteur exacte, mais pour déclencher un événement sonore. Un lien abstrait est établi entre contrôle et production sonore. Cela est d'autant plus important que l'on peut également y voir une première étape vers le contrôle du traitement sonore : il fallait en effet dans un premier temps détruire la relation directe de cause à effet entre la production sonore enclenchée et le résultat sonore obtenu pour pouvoir ensuite penser à déterminer le résultat sonore obtenu non plus par une action physique, mais par une formalisation abstraite.

La recherche de sonorités innovatrices a naturellement guidé J. Cage vers l'intégration de « nouveaux instruments » dans ses compositions : les machines permettant la reproduction sonore. Dès 1939, J. Cage compose sa pièce *Imaginary Landscape No. 1* pour deux tourne-disques avec « disques de mesure[13] », piano étouffé et cymbales. Les disques peuvent tourner à deux vitesses différentes, les glissandi sont possibles en freinant manuellement la rotation, et des rythmes sont crées en abaissant et en levant le bras du tourne-disque. La diversité des paramètres sur lesquels il est possible de jouer suit donc les possibilités mécaniques des appareils.

La radio devient un autre support pour J. Cage. *Imaginary Landscape No. 4* (1951) est une partition pour 12 appareils radiophoniques « joués » par 24 interprètes. J. Cage, qui écrit la partition avec une très grande précision, sépare ici l'événement sonore de son contenu. La forme de la pièce, l'enchaînement des événements et leurs amplitudes, les changements de fréquences des stations sont fixés, mais personne ne peut prévoir quels sons le public entendra, dans la mesure où ce sont les émissions en cours qui sont utilisées comme « matière première » au moment de

[13] Ces disques n'étaient pas des enregistrements de pièces musicales mais de sons tests à fréquences stables et variables.

l'exécution.

Cette séparation entre les événements sonores et leur moyen de contrôle est particulièrement intéressante, car on trouve ici certaines racines des moyens utilisés aujourd'hui pour contrôler le traitement sonore grâce à des règles compositionnelles abstraites et formalisées.

J. Cage continue sur cette voie en travaillant avec des magnétophones. En 1951, il fonde avec David Tudor le *Project of Music for Magnetic Tape* à New York, qui leur permet d'engager deux techniciens, Louis et Bebe Barron. La pièce la plus connue née de cette collaboration est *Williams Mix* de J. Cage, terminée en 1952. (Paul Williams, mécène du *Project of Music for Magnetic Tape*, était le commanditaire de la pièce). Dans cette pièce, J. Cage répartit les sons en six familles : (A) sons de la ville, (B) sons de la campagne, (C) sons électroniques, (D) sons produits par la main humaine (ce qui inclut les sons musicaux), (E) sons produits par le souffle (y compris la voix), (F) « petits » sons nécessitant une amplification. Un second niveau de classification comprend les paramètres fréquence, spectre et amplitude. Pour chacun de ces trois paramètres, J. Cage fait la distinction entre une qualité « définie » (lettre « c » dans la partition) ou « indéfinie » (lettre « v »). Un son désigne par Accv fait référence à un son de ville avec fréquence et spectre bien définis mais une amplitude aléatoire.

La première étape de ce travail consiste à enregistrer des sons appartenant à ces diverses catégories. J. Cage conçoit la pièce pour huit magnétophones et réalise une partition graphique indiquant les coupures et le montage des segments de la bande en format 1:1. [PRITCHETT, 1993, p. 90]

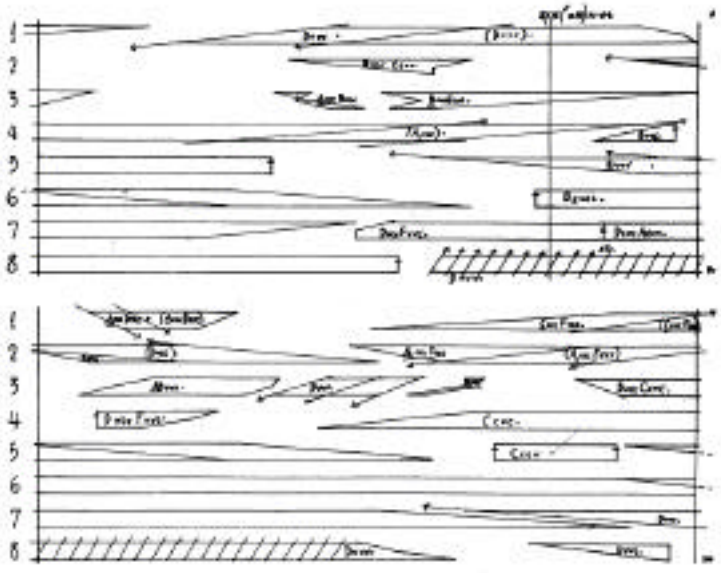


Fig. 1.2 La partition de *Williams Mix* compte 192 pages et dure 4.30 minutes. L'axe temporel est proportionel à la longueur en centimètres de la bande. Outre les groupements sonores et la répartition des sons sur les huit pistes, la partition décrit les formes des débuts et des fins de segments et indique comment les coupures doivent être effectuées à la fin de la bande.[14]

Tous les choix possibles (type de son; paramètres de prédictibilité de fréquence, spectre et amplitude; forme d'attaque et de conclusion d'un segment; durée; numéro de piste) sont laissés au hasard, suivant les règles de *IChing*[15]. Pour J. Cage, composer consiste à organiser les sons en groupes et sous-classes selon des paramètres bien définis, avant d'effectuer un choix parmi eux suivant des règles aléatoires. C'est un aléatoire organisé.

Cette méthode de travail peut être vue comme une première application de la *synthèse granulaire* au sens large du terme. Dans un ensemble de sons prédéfinis, une sélection de fragments sonores avec leurs durées et pauses, avec leur localisation spatiale sur les 8 pistes, leur forme d'attaque, ..., sont organisés selon des règles aléatoires.

Les applications de la synthèse granulaire sur ordinateur nous permettent aujourd'hui de choisir de courts segments (grains) dans un ou plusieurs sons selon des règles soit aléatoires, soit déterminées, avant de les assembler en créant des couches sonores. Nous reviendrons dans la

[14] Illustration dans [PRITCHETT, 1993, p. 91]
[15] Méthode chinoise réglant la place laissée au hasard dans un processus de choix.

troisième partie de ce mémoire sur l'utilisation de méthodes aléatoires appliquées au contrôle du traitement sonore .

La libération du son voulue par J. Cage ne mène donc pas au chaos mais aboutit à une libération plus ou moins déterminée des éléments sonores utilisés. J. Cage atteint ce but en contrôlant le matériau utilisé et ses qualités sonores avec une grande précision, tout en livrant l'ensemble à un système externe régi par un élément échappant à l'influence du compositeur : le hasard.

Nous avons donc vu dans cette première sous-partie que l'introduction des bruits et des sons enregistrés dans la musique, ainsi que des réalisations annonçant diverses méthodes de traitement sonore développées ultérieurement, se sont déployées de façon empirique, sans qu'un système compositionnel spécifique ne soit développé pour construire des œuvres avec ces nouveaux moyens sonores. Les deux sous-parties suivantes vont maintenant nous permettre de voir comment divers systèmes musicaux spécifiquement conçus pour utiliser les nouveaux moyens de production sonores qui s'offrent aux compositeurs vont voir le jour. A Paris, Pierre Schaeffer développe la « musique concrète » qui part du monde sonore enregistré pour construire à partir de ces éléments des pièces à la structure intrinsèque. En Allemagne, l'école de « musique électronique » se penche tout d'abord sur la définition et l'organisation des paramètres compositionnels avant de prendre en compte le résultat sonore. Nous allons donc étudier successivement ces deux voies explorées pour tenter de doter les nouveaux matériaux musicaux d'un système de pensée et de modes de structure qui leur soient propres. Nous verrons dans le même temps que ces deux écoles marquent deux étapes distinctes vers un contrôle accru des paramètres compositionnels : si Pierre Schaeffer et le mouvement de « musique contrète » se laissent guider par leur écoute du matériau sonore enregistré, ne paramétrant ces sons que dans un deuxième temps, la démarche est exactement inverse pour la « musique électronique ». Ces compositeurs travaillent en effet tout d'abord au paramétrage pour ensuite seulement s'intéresser au résultat sonore obtenu.

1.2 La « musique concrète »

La « musique concrète », terme inventé en 1948 par Pierre Schaeffer à Paris, offre une démarche de travail bien spécifique avec des sons stockés sur support. À travers ses réflexions esthétiques et phénoménologiques, et ses recherches pour développer un classement des événements sonores et un nouveau solfège, Pierre Schaeffer pose la base de nombreux courants qui se développeront par la suite. Employer l'expression « musique concrète » indique déjà que la recherche musicale est doublée d'une démarche scientifique, ce qui distingue Pierre Schaeffer d'autres mouvements travaillant avec les sons et les bruits, tels les futuristes.

> « Le qualificatif d'abstrait est appliqué à la musique habituelle du fait qu'elle est d'abord conçue par l'esprit, puis notée théoriquement, enfin réalisée dans une exécution instrumentale. La musique « concrète », elle, est constituée à partir d'éléments préexistants, empruntés à n'importe quel matériau sonore, bruit ou son musical, puis composée expérimentalement par un montage direct[16]… »

Cette première définition que donne P. Schaeffer de la « musique concrète », bien que datée de décembre 1948, parut pour la première fois dans la revue *Polyphonie* en 1950 [CHION, 1991, p. 12].

P. Schaeffer cherchait des sons pouvant être assemblés pour *composer* une pièce. Le point de départ de sa première composition, *Etude aux Chemins de fer* se trouve donc non pas dans un imaginaire sonore mais dans le son même. La musique ne se déploie pas sur le papier mais via des microphones et un studio d'enregistrement.

Dès 1942, P. Schaeffer cherche à développer de nouvelles formes artistiques pour la radio dans le *Studio d'Essai* à Beaune, rebaptisé en 1946 le *Club d'Essai*. Étant avant tout une place dédiée à la lecture de textes littéraires, le studio lui permet de découvrir les possibilités esthétiques du microphone. Dans un article de 1946, il compare l'utilisation du microphone en musique avec l'emploi de la caméra pour le cinéma, et il commence à réfléchir sur l'emploi d'un microphone caché. Après la fin d'une interview avec Paul Claudel, ce dernier continua à parler, sans savoir que

[16] [SCHAEFFER, 1952, p. 35]

le micro était encore en train d'enregistrer. P. Schaeffer remarque tout de suite en écoutant ces passages une qualité très différente de la voix. La parole n'est pas « mise en scène », elle est donc beaucoup plus naturelle. Cette découverte eut une forte influence par la suite pour enrichir les modes d'expression radiophoniques et pour sortir ce travail du pur « théâtre littéraire » [FRISIUS, 1996, p. 38].

Un changement dans la relation avec le matériau compositionnel apparaît déjà clairement. Ce dernier n'est plus produit artificiellement ; P. Schaeffer reconnaît les qualités propres des sons qu'il utilise, ils doivent devenir objets de réflexion pour le compositeur.

La conception d'une première pièce « concrète » vient de l'idée d'une « symphonie des bruits ». P. Schaeffer pouvait se procurer facilement des enregistrements divers dans les archives de la radio. Il commence également à enregistrer des bruits de toutes sortes dans le studio. Ces matériaux sonores ouvrent des voies très riches mais P. Schaeffer se retrouve tout de suite confronté à des questions esthétiques et conceptuelles. Il souligne les énormes difficultés du compositeur placé à la frontière entre les bruits réalistes et les sons musicaux. Ces derniers restent toujours liés à la musique, alors que les premières font naître des associations d'idées avec des événements réels. Il note ses premières idées à propos de la possible structure d'une pièce :

> « Sur une pédale rythmique, parfois interrompue par un ralenti logarithmique, superposition de bruits circulaires ; cadence de bruits purs (?). Puis fugue des bruits différentiels. Terminer par une série de battements où alterneront le lâche et le serré. Le tout à traiter comme un andante. Ne pas avoir peur de la longueur, ni de la lenteur[17]. »

Nous voyons que l'organisation de cette esquisse reprend des termes musicaux très classiques. Même si la pratique réelle de la composition change radicalement, Pierre Schaeffer ne trouve pas immédiatement une forme musicale nouvelle et structure encore ses objets sonores grâce à des termes musicaux traditionnels.

Cependant, cela ne l'empêche pas de chercher à développer un système cohérent et original pour classer ces bruits. Il avait déjà pensé à organiser plusieurs sons de klaxons dans une

[17] [SCHAEFFER, 1952, p.12]

gamme traditionnelle et il songe à un piano de bruits sur lequel il pourrait jouer un son chromatiquement. Mais ces appareils n'étaient pas réalisables techniquement en 1948. Ses idées anticipent les réalisations effectuées à partir de 1951, les *phonogènes.* Le *phonogène à clavier* par exemple relie un magnétophone à un clavier de douze touches et à une mécanique de transposition — il s'agit en fait d'un magnétophone à vitesse variable, avec un contrôle des hauteurs par la gamme chromatique.

> « La hauteur et la durée d'un son enregistré sur bande magnétique sont respectivement proportionnelles à la vitesse et à la durée de lecture de ce son, lesquelles sont évidemment en raison inverse l'une de l'autre lorsqu'on utilise un magnétophone ordinaire. Si l'on modifie la vitesse de défilement de la bande devant la tête de lecture, on opère en effet ce que nous avons appelé une « transposition totale » du son soumis à l'expérience, qui devient d'autant plus grave qu'on le lit plus lentement (et donc, qu'il est plus long) et inversement, d'autant plus aigu qu'on le lit plus vite (c'est-à-dire qu'il est plus bref)[18]. »

Fig. 1.3 Le phonogène à clavier (1951)[19]

Il nous semble important de souligner le fait que tout comme les futuristes, P. Schaeffer considère l'altération de la hauteur d'un bruit comme un paramètre compositionnel important (Russolo en 1913 pensait à transposer des bruits). Le *phonogène à clavier,* développé en 1951, est déjà un modèle de contrôle du traitement sonore.

[18] [SCHAEFFER, 1966, p.425]
[19] Illustration dans [ROBERT, 1999, p. 330]

> « Le phonogène de Schaeffer réalise la transposition totale en faisant tourner une boucle de bande magnétique sur laquelle est inscrit le signal à des vitesses variant selon les écarts de fréquence de la gamme tempérée [...][20] »

Grâce à ce phonogène, une idée compositionnelle (une mélodie) peut être appliquée à un son. Comme nous le verrons dans la troisième partie de ce mémoire, le traitement de la hauteur, contrôlable avec très grande précision, peut être aujourd'hui lié aux processus d'écriture formalisée.

Autre élément de traitement sonore, la technique du « sillon fermé » lui permet de répéter le même fragment d'un son enregistré sur un disque - l'aiguille retombe après une rotation du disque dans le même sillon. Très tôt, P. Schaeffer découvre également ce qu'il appelle le « micromontage ». Il coupe l'attaque d'une cloche et se retrouve devant une nouvelle sonorité, qui rappelle celle d'un hautbois [SCHAEFFER, 1952, p. 15]. Avec la découverte des « sons amputés », il manipule pour la première fois l'intérieur d'un son en changeant sa microstructure. Cette technique se développe encore avec l'arrivée des premiers magnétophones vers la fin des années 1950, qui offrent des pistes pratiques plus importantes que le travail avec les phonographes, notamment du fait de la possibilité de manipuler la bande magnétique.

La progression temporelle de tous les événements sonores stockés sur support suivent le déroulement de la bande. Ils ne s'articulent pas en mesure et pulsation mais peuvent se quantifier en temps absolu en secondes, et être traduits en longueurs, centimètres et millimètres de la bande. Le processus de transformation le plus important est la coupure. Elle permet de changer la durée, la structure temporelle, la dynamique et même le contexte du son enregistré. Couper c'est interrompre les bruits ou sons dans n'importe quelle phase de leur évolution. Le montage est directement lié à la coupure. Des fragments de différentes provenances peuvent être collés l'un après l'autre. L'échelle temporelle possible va du montage microscopique à des longueurs partie prenante de la forme, dépassant les capacités perceptives.

> « Comme on le voit, les ciseaux sont en quelque sorte le stylo du compositeur de musique électroacoustique ; il lui permettant la 'double écriture' de la musique sur bande :

[20] [MOLES, 1960, p. 71]

> ‘intervention à l’intérieur des sons dans leur morphologie, et l’articulation des sons dans leur succession[21]. »

Un type spécial de montage est la boucle : la répétition d’un fragment. Le rythme d’un « sillon fermé » dépend encore de la vitesse de rotation du disque, la longueur de boucle de la bande en est indépendante[22]. Un son ainsi isolé de son contexte fait peu à peu oublier sa provenance sémantique et se transforme en rythme stéréotypé. Sur le plan de la perception temporelle, il s’agit d’un paradoxe : le temps s’arrête alors même qu’un effet de mouvement est créé.

Steve Reich par exemple se servira beaucoup plus tard de boucles dans sa composition *Come out* de 1966. La phrase *come out to show them*[23] était montée sur deux boucles de longueurs légèrement différentes. En les jouant simultanément, S. Reich obtient un déphasage rythmique que l’on retrouve aussi dans ses œuvres instrumentales telle que *Pianophase* et *Marimbaphase.*

Un autre « traitement » sonore connu depuis longtemps — jouer les sons à l’envers — est systématisé par P. Schaeffer pour la première fois en 1948.

> « Personne n’a jamais considéré le son à l’envers comme une matière musicale susceptible de construction et d’architecture. Pourtant le son à l’envers double déjà, du moins a *priori*, le nombre des instruments connus.[24] »

Nous voyons donc que manipuler le son grâce à des machines avant de réfléchir à partir du résultat sonore obtenu pousse les compositeurs à penser selon de nouvelles catégories de paramètres. Déterminer les paramètres physiques liés au son permet de les transformer et de les détourner pour développer un nouveau langage musical.

La découverte de ces manipulations techniques, contribue à inciter P. Schaeffer à se concentrer sur des projets et thèmes plus concrets. Il prend ses distances par rapport à son idée

[21] [CHION&REIBEL,1976, p. 220]
[22] Il existe malgré tout une limite physique minimale pour créer une boucle et pouvoir la faire passer devant la tête de lecture de l’appareil.
[23] “ sort pour leur montrer ”
[24] [SCHAEFFER, 1952, p. 17]

initiale d'une « symphonie des bruits » et conçoit un « concert de locomotives ». Le 3 mai 1948, équipé du matériel d'enregistrement nécessaire, il se rend à la gare des Batignolles. Il fait mettre en marche six locomotives qu'il dirige comme des instruments de musique dans une sorte d'improvisation. [SCHAEFFER, 1952, p. 19]

Qu'il utilise lui-même le terme d'improvisation est surprenant. Nous voyons qu'une méthode de structuration de l'objet sonore n'est pas encore née. Il essaye de générer un matériau sonore plus au moins complexe. Mais la fascination ressentie à la gare se dissipe vite dans le studio. En écoutant les résultats de ces enregistrements, P. Schaeffer constate qu'ils sont trop chaotiques sur le plan rythmique pour être expressifs sur le plan musical. Pour améliorer les qualités radiophoniques et musicales de sa pièce, il abandonne l'idée d'un « concert des locomotives » et pense plutôt à un film acoustique complexe, qui traite le thème « chemin de fer » avec des perspectives acoustiques diverses — comme pour un film.

P. Schaeffer trouve dans les archives de la radio des disques avec des bruits des wagons et il développe une partition.

> « J'ai composé une partition. Huit mesures de démarrage. Accelerando confié à une locomotive solo, puis tutti de wagons. Rythmes. il y en a de très beaux. J'ai isolé un certain nombre de leit-motiv qu'il faudrait monter un enchaînement, en contre-point. Puis ralenti et arrêt. Cadence de coups de tampons. Da-capo et reprise, en plus violent, des éléments précédents. Crescendo[25]. »

Nous trouvons de nouveau une quantité de termes musicaux traditionnels tels que *mesure, accelerando, solo, tutti, contrepoint*, etc. Éléments musicaux, les bruits sont encore pensés par rapport à la fonction et à la signification de notes traditionnelles.

Dans le même ordre d'idée, P. Schaeffer tente de se servir d'une partition pour composer l'*Étude aux tourniquet*s en 1948. Il enregistre dans un premier temps de courtes phrases instrumentales plus complexes que des événements sonores simples et organise leur montage sur

[25] [SCHAEFFER, 1952, p. 19]

papier. Il constate au cours du travail que les résultats sonores sont meilleurs s'il traite les sons d'une façon plus complexe que ce qui est notable et abandonne la partition [SCHAEFFER, 1952, pp. 25-26].

Si nous comparons l'approche de P. Schaeffer avec celle de J. Cage quelques années plus tard dans sa pièce *Williams Mix,* nous pouvons constater que J. Cage met en place la structure globale des événements sonores sans contrôler le son alors que P. Schaeffer se laisse guider par l'écoute des sons et crée des objets sonores l'un après l'autre avant de les mettre en relation. Une formalisation préalable grâce à une partition écrite n'est donc plus adaptée à cette nouvelle musique sur support.

Pierre Schaeffer utilise diverses techniques, comme la transposition, le sillon fermé et les sons joués à l'envers, pour composer son *Etude aux Chemins de fer*. Toute la pièce est basée sur un mélange entre des matériaux structurés et des effets radiophoniques. Au début de sa pièce, P. Schaeffer présente les divers éléments employés de façon très systématique avant d'atteindre une grande complexité après seulement deux minutes. Le fait de reprendre au cours de la pièce le début ralenti — et donc transposé dans le grave — nous semble particulièrement intéressant. Ce n'est plus uniquement la transposition d'un son, mais de toute une séquence déjà composée qui devient matériau du traitement sonore ; cette technique sera par la suite employée dans de nombreuses œuvres. Une nouvelle catégorie de matériaux préstructurés, précomposés, se développe, ouvrant la voies à de nouvelles relations entre microstructure et macrostructure, rythme et forme, élément isolé et structure globale. C'est surtout grâce au traitement de la durée d'un son que ces catégories deviennent étroitement liées. Ce qui était une structure composée peut devenir par contraction temporelle un événement ; ce qui était un objet sonore peut devenir par dilatation temporelle un élément lié à la forme d'une pièce.

Pouvoir lier ainsi de façon organique structure et élément en manipulant des paramètres compositionnels abstraits (comme par exemple la durée d'un son), permet donc de mettre à jour une

nouvelle méthode pour créer des parentés et des liens intrinsèques entre les divers niveaux d'une pièce musicale (pour reprendre l'exemple introduit plus haut, une structure composée et un élément musical peuvent être déduits l'un de l'autre). Ces liens peuvent permettre d'introduire une cohérence dans le discours musical, de l'organiser; cela débouche donc sur la possibilité de structurer les pièces de « musique contrète » selon des règles qui leur sont propres.

P. Schaeffer, n'étant pas musicien professionnel[26], cherche toujours à établir une collaboration avec d'autres compositeurs. Pierre Henry intègre ainsi le studio en 1949. Après une première étude, appelée *bidule en ut*, P. Schaeffer et P. Henry commencent à travailler sur la *Symphonie pour un homme seul*. Ce titre comporte un double sens. Il fait d'une part allusion à la source des bruits utilisés, qui ont tous été émis par un seul être humain ; par ailleurs, ce titre fait référence à un homme solitaire. Deux personnes isolées, P. Schaeffer et P. Henry, créent une musique pour un spectateur « isolé » devant sa radio. Mais cette pièce est également un moment de communication entre P. Henry, qui crée les sons et bruits expérimentaux dans le studio, et P. Schaeffer, qui les enregistre et les transforme dans le même temps. Les différents mouvements de la *Symphonie pour un homme seul* n'ont rien en commun avec la forme traditionnelle d'une symphonie. Nous nous retrouvons plutôt devant un entrelacs de bruits et de sons instrumentaux, guidés par des *leitmotivs.*

Le deuxième grand œuvre née de la collaboration entre P. Schaeffer et P. Henry est *Orphée'53* qui mêle les sons concrets à des textes et des passages joués en direct, le tout avec une mise en scène. Cette pièce montre clairement que les intentions des deux compositeurs divergent de plus en plus. P. Schaeffer veut réaliser un opéra, qui combine les éléments musicaux traditionnels avec la musique concrète. Henry ne s'intéresse guère à la forme « rassurante » d'un opéra et se concentre surtout sur la partie finale, *Le voile d'Orphée*, qu'il réalise seul. Il y explore la radicalité sonore rendue possible par la « musique pour haut-parleurs ». Il combine un texte enregistré —

[26] Les parents de Schaeffer, musiciens professionnels, l'avaient initié à la musique. Il suit ensuite des cours de violoncelle au conservatoire de Nancy et avant d'intégrer dans les années 30 la classe d'analyse musicale de Nadia Boulanger à l'Ecole Normale de Musique de Paris. [DALLET&BRUNET, 1996, p.23]

un hymne à Zeus — avec des sons d'instruments préparés et de grands glissandi très imposants, jamais entendus auparavant. La création[27] d'*Orphée'53* à Donaueschingen en 1953 et le scandale qui s'en suit sont importants pour la suite du développement de la musique concrète en général. L'échec est particulièrement amer pour P. Schaeffer : ce concert a lieu en Allemagne, ancien pays ennemi, et il a l'impression que la « musique concrète » française est dévalorisée par rapport à la « musique électronique » allemande.

Un trait caractéristique de la « musique concrète » des premières années tient donc au renoncement à toutes règles traditionnelles, remplacées par une imagination sonore très riche. L'utilisation de nouvelles techniques et l'application des quelques traitements alors possibles comme le « sillon fermé », la transposition par changement de la vitesse de défilement, le son à l'envers, la coupure de la bande et le montage, permettent aux compositeurs de développer de nouveaux éléments structurants et d'explorer de nouvelles relations entre conception et réalisation. Les paramètres compositionnels manipulés dépendent directement des outils techniques disponibles et du résultat sonore. Le seul critère important de jugement est l'oreille du compositeur. Cette orientation amène la « musique concrète » a se développer en opposition flagrante par rapport à la « musique électronique » de Cologne. A l'inverse, la « musique électronique » va faire de la manipulation de ces paramètres le moteur du développement d'une pièce, l'oreille ne venant qu'en second.

[27] Une première version a déjà été créée en 1951 sous le titre " Toute la Lyre "

1.3 La « musique électronique »

La naissance de la « musique électronique » en Allemagne est surtout le fait d'Herbert Eimert. En 1924, ce journaliste, compositeur et organisateur d'événements musicaux alors âgé de 27 ans avait déjà publié une « Theorie de la musique atonale[28] », écrite durant ses études de composition à Cologne. Derrière ce titre se cache en fait une des premières théories dodécaphonique, alors que les compositions dodécaphoniques de Schönberg ne sont encore connues que par ses amis proches. Ces idées continuèrent à être une part importante des recherches d'H. Eimert : il publie en 1950 une méthode dodécaphonique[29], et en 1964 un livre intitulé « Les bases de la composition sérielle[30] » qui est toujours un livre musicologique de référence [KÄMPER, 1997, p. 36].

Par ailleurs, en 1926, H. Eimert réalise pour le groupe de danseurs Laban-Tanz-Gruppe de Cologne une musique de « couleurs et bruits » influencée par les idées futuristes italiennes, conçue pour des instruments mécaniques qu'il avait construits lui-même avec l'aide de son ami Erich Doerlemann.

Il n'est guère étonnant qu'un esprit aussi ouvert s'intéresse également aux nouvelles formes de communications telles que la radio. À partir de 1927 il diffuse des conférences radiophoniques sur la Westdeutscher Rundfunk Köln (WDR).

En 1947, on lui confie la direction du département des reportages culturels au sein de la *Nordwestdeutscher Rundfunk Köln (NWDR[31])* et il commence en 1948 la célèbre série *Musikalisches Nachtprogramm[32]*. Cette institution devient sous sa direction un forum d'une importance extraordinaire pour la jeune génération de compositeurs. Dans ces émissions,

[28] Herbert Eimert, *Atonale Musiklehre,* Breitkopf & Härtel, Leipzig, 1924
[29] Herbert Eimert, *Lehrbuch der Zwölftontechnik*, Breitkopf & Härtel, Wiesbaden, 1950
[30] Herbert Eimert, *Grundlagen der mujsikalischen Reihentechnik,* Universal Edition, Wien, 1964
[31] Appelé uniquement *Westdeutscher Rundfunk (WDR)* par la suite
[32] Programme musical de nuit.

H. Eimert diffuse dès le début des années cinquante les premières œuvres instrumentales de K. Stockhausen et la musique de J. Cage, encore complètement inconnu en Europe.

Werner Meyer-Eppler est un autre nom très lié à la période de conception de la musique électronique. Directeur du département *Kommunikationsforschung und Phonetik* à l'université de Bonn, il invite en 1948 l'Américain Homer Dudley, physicien au Bell Telephone Laboratories (New Jersey). H. Dudley amène un vocodeur[33], un appareil pouvant servir à la fois pour analyser un spectre sonore et pour synthétiser ces analyses spectrales. L'analyse s'effectue grâce à une série de filtres, coupant le spectre en bandes et permettant d'analyser l'amplitude de chaque bande. W. Meyer-Eppler effectue par la suite des analyses de la parole - la décomposition de phénomènes acoustiques a donc aidé à comprendre les sons. Cette exploration de l'analyse spectrale a eu ultérieurement une influence sur toute la conception de la synthèse.

Le vocodeur servit à W. Meyer-Eppler uniquement pour l'analyse spectrale. Beaucoup d'autres musiciens l'ont utilisé plus tard comme outil de traitement sonore pour moduler le spectre d'un son par le spectre d'un autre.

En 1950 l'instrument électronique « Melochord », construction de Harald Bode, arrive dans les laboratoires de W. Meyer-Eppler et une première suite d'études — « modèles sonores » — est réalisée en superposant des sons provenant de cet instrument. [MANNING, 1993, p. 43-44].

Le 18 octobre 1951 marque une date importante : H. Eimert consacre toute une émission à la musique électronique ; ses premières études et des interviews de W. Meyer-Eppler sont diffusées. À la suite de cette émission, l'intendant du NWDR, Hanns Hartmann lui offre la possibilité de créer un studio de musique électronique au sein de la maison de la radio [KÄMPER, 1997, p. 37].

[33] Le premièr vocodeur a été construit en 1936 par H. Dudley au *Bell Laboratories.*

Ce studio attire beaucoup de jeunes compositeurs tels que Robert Beyer, Paul Gredinger, Karel Goeyvaerts, Henri Pousseur, Gottfried Michael Koenig, Giselher Klebe, Bengt Hambreaeus, Franco Evangelisti et Karlheinz Stockhausen. C'est surtout avec ce dernier qu'H. Eimert développe une relation très étroite.

Avant de travailler à Cologne, K. Stockhausen avait suivi à partir de janvier 1952 les cours d'esthétique et d'analyse d'Olivier Messiaen à Paris. Le studio de P. Schaeffer accueille quelques élèves d'O. Messiaen, comme Pierre Boulez et K. Stockhausen. Depuis 1951, les magnétophones installés dans ce studio permettent aux jeunes compositeurs de manipuler la bande de façon très minutieuse. Ce contrôle exact de la durée leur permet d'élaborer des schémas rythmiques complexes. Par ailleurs, pouvoir utiliser le *phonogène à clavier* pour transposer sur des hauteurs précises leur donne la possibilité d'appliquer des méthodes sérielles de composition. Quelques œuvres témoignent cette approche : *Étude 1* et *Étude 2* de P. Boulez, *Antiphonie* et *Vocalises* de P. Henry et *Étude concrète*[34] de K. Stockhausen.

Le travail sur bande leur permet donc de quantifier les durées des sons selon des règles sérielles, et également d'organiser des transpositions suivant la série.

P. Schaeffer accordait peu de sympathie à ces constructions abstraites, à l'opposé de sa démarche empirique. Il se sépare en 1953 de K. Stockhausen, qui devient par la suite le compositeur le plus important du studio de « musique électronique » de Cologne.

La correspondance échangée entre H. Eimert et K. Stockhausen nous apprend beaucoup sur le séjour de K. Stockhausen à Paris. Dans une lettre de décembre 1952 notamment, K. Stockhausen révèle certains aspects de sa conception du métier de compositeur [KÄMPER, 1997, p. 38]. Ses expériences pendant la réalisation de l'*Étude concrète* l'ont convaincu que le travail avec des sons enregistrés est par essence imparfaite et ne peut qu'échouer. En effet, ces sons gardent toujours leur personnalité première qui est étrangère à leur structure musicale. Ces sons

[34] Également connue sous le titre *Étude aux 1000 collants.*

introduisent un côté indéterminé, impropre à un développement structurel.

Ce sont des idées que l'on retrouve dans les premiers écrits de K. Stockhausen, *Situation des Handwerks*[35] par exemple. Il écrit notamment qu'étant un agencement ordonné de sons, la musique est conforme à la capacité humaine de percevoir un ordre sonore. Dans un tel ordre, tous les éléments sont égaux en droit. Le sens de l'ordre se base sur la relation rendue nécessaire entre les divers éléments et le système qui les ordonne. Le fait que chaque élément doit procéder du système exclut le choix d'un matériau déjà existant, donc déjà ordonné et formé. Les sons préexistants ne peuvent pas être intégrés, mais uniquement arrangés ; or sans intégration, cette relation nécessaire ne peut pas être développée. K. Stockhausen pressent que la création des sons électroniques permettra dans le futur de penser le matériau d'une façon ordonnante. Il cherche avant tout à lier intrinsèquement la texture du matériau et la structure de l'œuvre [STOCKHAUSEN, 1963a, p. 17-23] et [STOCKHAUSEN, 1963b, p. 35].

Mais il y avait déjà d'autres compositeurs qui pensaient à la possibilité d'une synthèse sonore. Dès le début de ce siècle, Ferruccio Busoni avait développé dans son *Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst*[36] une théorie comportant des tiers de tons et envisageait sa réalisation avec le *Dynamophone* de Thaddeus Cahill, capable de produire des sons de n'importe quelle fréquence et intensité, et leurs harmoniques. [BUSONI, 1983, p. 78].

Cet instrument électronique, réalisé entre 1896 et 1906, fut plus tard connu sous le nom de *Telharmonium*. Il permet à l'interprète de contrôler les timbres sonores grâce à une sorte de synthèse additive, chaque composant du spectre étant généré par une dynamo rotative, reproduisant une forme d'onde [RUSCHKOWSKI, 1998, pp. 18-20].

L'invention du *Telharmonium* se base sur les découvertes faites par différents scientifiques depuis le XVIIe siècle : l'abbé Marin Mersenne détermina en 1636 les rapports des

[35] " Situation du métier de compositeur "
[36] " Esquisse d'une nouvelle esthétique de l'art sonore "

fréquences des notes de la gamme et mesura la vitesse du son. Il démontra l'existence des sons harmoniques. Le mathématicien français Joseph Fourier développe en 1822 une expression mathématique de la théorie des harmoniques. Il trouve que sous certaines conditions, il est possible d'écrire une fonction arbitraire f(x) sous la forme d'une somme de fonctions trigonométriques sinus et cosinus. En 1843, le physicien allemand Georg Simon Ohm émet l'hypothèse de la nature complexe des timbres et proclame qu'un son musical est le résultat de l'addition de plusieurs sons simples. C'est Herrman von Helmholtz qui souligne en 1863 dans sa *Lehre von den Tonempfindungen*[37] que n'importe quel événement sonore peut être dissocié en composants sinusoïdaux.

Ces recherches ont été fondamentales dans le développement des techniques de synthèse. De plus, avec des outils d'analyse tels que le *vocodeur* et le *spectrographe,* qui permettent de visualiser les composants spectraux, les découvertes de J. Fourier et de H. Helmholtz ne sont plus purement théoriques, mais peuvent être utilisées pour composer des sons.

Les connaissances scientifiques deviennent importantes aux yeux des musiciens qui en font plus que jamais l'objet de leurs réflexions. En effet, le compositeur n'écrit plus pour des instruments existants; c'est à lui de construire les sonorités qu'il utilise et de comprendre pour cela les lois physiques et acoustiques du monde musical. Ces paramètres scientifiques deviennent donc partie prenante de sa conception musicale et se transforment en paramètres compositionnels.

Tandis que la « musique concrète » avait pour source des sons déjà existants transformés par le biais de transpositions, de changements de vitesse, de filtrages et de montages, les premières pièces de « musique électronique » créent tous les sons utilisés par addition de partiels. C'est l'innovation de la structure interne même du son qui devient sujet de composition. Équipé d'un générateur de sinusoïdes et de magnétophones, les compositeurs de musique électronique superposent par mixage des sons sinusoïdaux simples pour créer des sons complexes.

[37] " Théorie des Sensations sonores "

Karel Goeyvaerts avec sa *Komposition Nr. 5* et K. Stockhausen avec sa *Studie 1* sont les premiers à appliquer à la création des timbres des méthodes sérielles. Ils travaillent tous deux au studio de Cologne et se connaissaient depuis 1951. Le compositeur belge K. Geoyvaerts eut une forte influence sur le développement des idées naissantes de K. Stockhausen concernant la musique sérielle et électronique. Ils ont entretenu une correspondance régulière pendant cinq ans, échangeant leurs idées compositionnelles [SABBE, 1973, pp. 101-113].

K. Stockhausen trouve également une clé dans les idées et œuvres d'Anton Webern : adopter le principe de la série implique de choisir pour une composition un nombre limité d'entités qui doivent avoir des relations proportionnelles entre elles. Celles-ci s'appliquent à tous les éléments de la pièce. La série devient le principe structurant total. Une autre source pour K. Stockhausen est la notion de *Klangfarbenmelodie*[38]. Arnold Schönberg l'avait définie en 1911 dans son livre *Harmonielehre*[39]. Un ensemble de timbres peut être structuré et contrôlé de la même manière qu'une mélodie de hauteurs. Nous trouvons l'application de cette méthode dans la troisième pièce des *Cinq pièces op. 16* pour orchestre de 1909, dans laquelle il n'y a plus de mélodie mais un accord de cinq notes, modulé grâce à des changements d'orchestration.

L'application de la série non seulement à la forme, aux durées, hauteurs et dynamiques mais également aux spectres d'un son, permet à K. Stockhausen de composer des variations sérielles de timbres.

> « Même si les partiels d'un agglomérat de sinusoïdes déterminés selon la technique sérielle quant à leurs proportions intervalliques, leurs amplitudes et leurs durées ne peuvent plus être distingués l'un de l'autre à l'écoute, ce qui donne l'impression d'un son complexe réduit à une unité — cela est particulièrement approprié pour la « composition de timbres » — même dans ce cas il est essentiel qu'une famille de sons existe dans l'œuvre du fait d'un choix spécifique de proportions sérielles, et que cette famille atteigne un certain degré d'homogénéité et d'exclusivité correspondant à la série qui est alors caractéristique de cette composition spécifique[40]. »

[38] Mélodie des couleurs sonores.

[39] Traité d'harmonie.

[40] C'est nous qui traduisons. Texte original : " *Selbst wenn die Teiltöne mit ihren seriell bestimmten Intervall-, Lautstärke- und Zeitdauernproportionen in einem Sinustongemisch nicht mehr einzeln hörbar werden und der Eindruck eines zu einer Einheit zusammengeschmolzenen Klangkomplexes resultiert - was ja gerade bei der 'Klangfarben-Komposition' besonders beabsichtigt ist - selbt dann ist es doch wesentlich, daß auf Grund einer bestimmten seriellen Auswahl und*

Ce travail se base sur des fondements scientifiques que Werner Mayer-Eppler avait mis à jour[41]. K. Stockhausen avait suivi ses classes de phonétique et de théorie informatique à Bonn. L'émancipation du timbre sur le plan structurel ainsi que des progressions continues d'une caractéristique spectrale à une autre deviennent envisageables.

K. Stockhausen s'intéresse également au continuum sinusoïde-bruit et a certains aspects de la perception sonore pour lesquels le facteur « temps » joue un rôle essentiel. Par exemple, un événement sonore plus court que 25 millisecondes n'est plus perçu comme une hauteur précise mais plutôt comme une courte impulsion. La frontière entre son et bruit ne se base donc pas uniquement sur la définition du contenu spectral [STOCKHAUSEN, 1963c, pp. 45-61].

L'étude de la perception des phénomènes sonores influence la conception de la *Studie 1* que nous analyserons de façon plus détaillée dans la seconde partie de notre mémoire. D'après ses notes de travail, K. Stockhausen base ses séries non seulement sur des proportions calculées, donc abstraites, mais aussi sur les lois de la perception. Il n'applique pas « à l'aveugle » des concepts sériels aux sinusoïdes mais il développe un système qui prend les aspects perceptuels en considération. Cette intégration des phénomènes psychoacoustiques dans la démarche compositionnelle nous intéresse particulièrement, car elle montre qu'un concept de formalisation du sonore n'a pas de valeur en soi et ne peut pas être isolé de l'acoustique. Nous retrouverons cette nécessité dans la troisième partie de ce travail : appliquer des paramètres compositionnels formalisés sans connaître les qualités du son à traiter n'a pas de sens.

Un autre exemple de cette discipline méthodique est l'œuvre *Essay* de Gottfried Michael Koenig[42]. Cette partition, comme celle de *Studie 2* de K. Stockhausen[43], doit permettre à un autre

---

Proportionierung <u>eine</u> Familie von Klängen in einem Werk existiert, und daß diese Klangfamilie einen der Reihe entsprechenden Grad an Homogenität und Exklusivität erreicht, der dann für diese bestimmte kkomposition charakteristisch ist. " [STOCKHAUSEN, 1963c, p.50]

[41] [MEYER-EPPLER, 1949]

[42] Gottfried Michael Koenig - *Essay*, Universal Edition, Wien, 1960

[43] Karlheinz Stockhausen "Studie 2", Universal Edition, Wien, 1954

compositeur de recréer la pièce. Tous les paramètres nécessaires pour la réalisation sont notés. Plusieurs réalisations de la *Studie 2* ont d'ailleurs été exécutées — pour ne citer que les plus récentes : celle de Brice Pauset, en 1996, à l'aide du Programme *Max* sur une station de travail de l'IRCAM[44], et celle de Flo Menezes en 1999 à l'aide du programme *Csound*[45].

Essay de G. M. Koenig et *Studie 2* de K. Stockhausen peuvent être compris comme des tentatives particulièrement radicales pour réduire le champ sonore infini aux figures acoustiques d'une structuration totale. Ces concepts développés à Cologne ont eu par la suite une forte influence sur d'autres studios, notamment du fait de l'intégration de l'ordinateur dans les processus de composition : un modèle abstrait (le programme) permet de jouer avec d'innombrables combinaisons et relations entre les éléments. Cette voie menant plutôt vers le contrôle de la synthèse, nous ne la suivrons pas davantage dans le cadre de ce travail. Nous étudierons néanmoins dans la dernière partie une possibilité d'union entre le processus de formalisation compositionnelle et le traitement sonore.

1.4 Influence réciproque des différentes techniques et conceptions

Nous venons donc d'étudier dans les deux sous-parties précédentes deux courants opposés qui sont allés chacun jusqu'au bout de leur logique propre. Dès les années cinquante cependant, ces concepts trop stricts pour pouvoir toujours être systématiquement utilisés commencent à s'influencer mutuellement.

Le but des premiers compositeurs de « musique électronique » étant l'organisation totale de tous les paramètres musicaux par l'application de règles sérielles et par la définition d'un champ abstrait de timbres, il est compréhensible qu'ils aient absolument voulu éviter toute association concrète pour ne pas être prédisposés au niveau sémantique. Sévères et rationnels, les

[44] Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique à Paris.

[45] Language de programmation pour la synthèse et le traitement sonore de Barry Vercoe. Successeur du programme Music V de Max Matthews.

compositeurs de musique électronique cherchent à composer leurs timbres en contrôlant chaque partiel. C'est de nouveau grâce à K. Stockhausen que cette recherche se transforme par la suite.

Dès 1955, K. Stockhausen élargit la palette sonore et compose des continuums entre sons électroniques et vocaux dans *Gesang der Jünglinge*[46], encore basé sur le sérialisme. L'idée structurante consiste à organiser tous les sons, électroniques et vocaux, sur un continuum entre bruit blanc et sinusoïde. Dans *Kontakte* pour piano, percussion et bande[47], K. Stockhausen explore en 1960 une médiation entre les instruments et l'électronique, particulièrement dans la dernière partie, qui atteint un profond équilibre entre sons et bruits. Il écrit en 1973 que tous les sons sont devenus matériaux musicaux potentiels. Il utilise par exemple des enregistrements de musique du monde dans *Telemusik* (1966)[48] et les hymnes nationaux dans *Hymnen* (1967)[49]. L'important pour lui est alors de travailler les associations entre les sons pour faire de la pièce un tout intégré, composé, et non pas présenté pièce par pièce comme à l'étalage d'un « marchand de sons ». Il faut mettre les sons utilisés en relation [STOCKHAUSEN, 1978, pp. 393-394].

En 1957, de retour à Paris après des missions radiophoniques effectuées dans les Territoires d'Outre-Mer, P. Schaeffer reprend ses recherches sur la « musique concrète » et change complètement de style. Ses raisons pour reconsidérer ses idées initiales sont multiples. Pendant son absence, le studio a été dirigé par P. Henry, qui s'est surtout concentré sur ses propres créations musicales. D'autres productions ont été réalisées — plutôt dans le genre radiophonique populaire et musique d'accompagnement, qui formait la base d'attaques contre la « musique concrète » en général.

À son retour, P. Schaeffer crée un groupe de recherche pour développer une nouvelle grammaire des phénomènes acoustiques. Dès 1952, P. Schaeffer avait entrepris un premier classement phénoménologique des sons avec Abraham Moles. Il publie la même année une syntaxe

[46] " Chant des adolescents "
[47] Karlheinz Stockhausen - *Kontakte für elektronische Klänge, Klavier und Schlagzeug,* Universal Edition, London, 1968.
[48] Karlheinz Stockhausen - *Telemusik,* Universal Edition, Wien, 1969.
[49] Karlheinz Stockhausen - *Hymnen, elektronische und konkrete Musik,* Universal Edition, Wien 1967.

pour la musique concrète, *Esquisse d'un solfège concret.* Il ordonne les objets sonores selon deux critères : un « classement matériel » et un « classement musical ». Plutôt guidé par un intérêt scientifique que compositionnel, il insiste pour que soient crées des archives sonores, et demande aux membres de son groupe de recherche de suivre un plan de travail très précis : définir une nouvelle forme de solfège systématique en écoutant divers objets sonores — réaliser des objets sonores originaux à titre d'entraînement — créer des objets musicaux ; apprendre à manipuler les machines — réaliser des esquisses avant d'entreprendre une composition.

Un changement fondamental a aussi eu lieu en ce qui concerne les sources sonores reconnaissables. La transformation de la musicalité latente d'un objet sonore en musicalité évidente ne passe plus par un contexte fonctionnel reconnaissable et par l'intelligibilité de la source sonore. Les matériaux sont complètement transformés par des traitements sonores et le but à atteindre est l'abstraction. Ce n'est que dans les années soixante, avec l'ouverture générale de la scène de l'art (happening, théâtre musical, multimédia) que la musique concrète revient à la reconnaissance de la source, notamment avec Luc Ferrari, qui développe sa « musique anecdotique ».

Les résultats des recherches de P. Schaeffer sont rassemblés dans ses deux livres *Traité des objets musicaux*, paru en 1966, et le *Solfège de l'objet sonore*, (1967), ouvrage accompagné de trois disques fournissant de nombreux exemples sonores. Ces ouvrages représentent une première théorie complète du travail sonore de P. Schaeffer. Son discours n'est ni purement scientifique, ni purement esthétique, sans être pour autant une confusion entre ces deux genres. Il cherche un principe de généralisation de la perception sonore, un regroupement des événements musicaux selon la définition des objets et de leurs structures. Le *Traité des objets musicaux* cherche à redéfinir des bases musicales guidées par la morphologie et la typologie du monde sonore. Le but est d'aboutir à des concepts musicaux basés uniquement sur le matériau. P. Schaeffer développe des critères comme « articulation », « dynamique », « masse » et « structure temporelle ». La perception se concentre sur un objet plus au moins complexe, et déchiffre sa structure globale et interne [SCHAEFFER, 1966].

L'écoute est relative et en aucun cas directement liée aux paramètres acoustiques. A l'aide de nombreux exemples encore surprenants de nos jours, P. Schaeffer nous démontre que les faits acoustiques et la perception ne concordent pas toujours et qu'une typologie du sonore, basée uniquement sur des règles arithmétiques, n'a pas de sens. Ces critères lui permettent d'ordonner le champ sonore et de développer des familles de proximité [WIEDL-ACHILLES, 1990, p. 18-25].

Grâce à ces études de timbre, il parvient à distinguer la composante matière et la composante forme, qui forment désormais deux critères de l'écoute musicale indépendants des paramètres acoustiques élémentaires.

Les conceptions de K. Stockhausen tout comme celles de Pierre Schaeffer évoluent donc pronfondément au cours des années cinquante. Par ailleurs, d'autres studios sont fondés au cours de la même décennie. Nous nous contenterons d'en citer quelques-uns : New York (1952), Tokyo (1954), Milan (1955), Varsovie (1957), Utrecht (1960). Ils exploreront à leur tour leur propre voie.

L'activité du studio de Cologne influença la conception du studio de Milan, fondé par Luciano Berio et Bruno Maderna en 1955, aux méthodes compositionnelles plus libres cependant. L. Berio n'attend pas des instruments électroniques qu'ils lui fournissent de nouveaux sons, mais qu'ils lui permettent d'intégrer les phénomènes sonores dans sa pensée musicale. Les compositeurs à Milan utilisent à la fois des sons électroniques et enregistrés. L. Berio explore dès le début les ressources de la voix humaine, notamment dans les pièces *Thema, Omaggio a Joyce* (1958) et *Visage* (1960-61).

Le studio de Berlin voit Ernst Krenek s'essayer en 1960 à une autre démarche. En contact avec Fritz Winckel, le directeur du studio de la *Technische Universität* (TU) de Berlin, Ernst Krenek conçoit une pièce destinée à être réalisée « par correspondance ». Compositeur d'origine autrichienne exilé aux États-Unis, E. Krenek poste au studio de Berlin une partition ainsi que des instructions pour sa réalisation. C'est l'ingénieur du son Rüdiger Rüfer qui réalise la pièce

intitulée *Elektronisches Musikprojekt*[50]. La partition en notation traditionnelle, très précise en ce qui concerne les durées et les hauteurs, notées en huitième de ton, est déjà moins exacte quant à la dynamique[51], et ne dit rien sur les timbres. Ces derniers sont notés sur une deuxième partition graphique, qui indique les fréquences et durées de chaque note et de ses partiels respectifs. La réverbération désirée est également décrite précisément. E. Krenek se base sur ses expériences faites dans le studio de Cologne dans les années cinquante, alors que K. Stockhausen composait sa *Studie 2* dans laquelle les agglomérats sinusoïdaux sont réverbérés.

La réalisation de ce *Elektronisches Musikprojekt* prit une tournure très difficile [GERTICH et al., 1996, pp. 73-83]. Même si le style sériel avec sa réduction des paramètres à des entités bien définies doit en théorie permettre la mise en œuvre de la pièce par quelqu'un d'autre, les choix artistiques ne pouvaient pas tous être faits sur le papier. Finalement, le travail de R. Rüfer est resté à l'état de fragment, ce qui n'a pas empêché qu'il soit joué en concert plusieurs fois[52].

Herbert Eimert compose entre 1960 et 1962 l'*Epitaph für Aikichi Kuboyama*. Elle a pour thème la mort du pêcheur japonais Aikichi Kuboyama en 1954, victime de la première bombe à hydrogène. Cette pièce se base sur des recherches effectuées durant les années cinquante. H. Eimert travaille avec des sons vocaux, tendance que l'on trouve déjà dans *Gesang der Jünglinge* (1956) de K. Stockhausen, dans *Thema, Omaggio a Joyce* (1958) de Luciano Berio et dans le *Pfingstoratorium*[53] d'Ernst Krenek. H. Eimert cependant ne combine pas des sons électroniques avec des sons vocaux. L'unique source sonore employée est la lecture de l'épitaphe gravée sur la tombe de Kuboyama. Cette pièce explore des dilatations temporelles de sons vocaux en utilisant le *Zeitregler* [HUMPERT, 1987, pp. 163-174]. Cette machine a été construite par Anton Springer et permet pour la première fois d'allonger un son sans changer sa hauteur, technique largement appliquée plus tard avec l'arrivé du *phase vocoder.* Ce découplage de

[50] "Projet de musique électronique", aussi connu sous le titre "Serielle Studi*e*" ("Etude Sérielle")

[51] La dynamique n'est indiquée qu'avec des signes conventionnels allant de pp à ff, en passant par crescendo et diminuendo.

[52] Pour une description plus détaillée de cette pièce, voir la traduction de l'article de Julia Gerlach *Aus der Ferne : Ernst Kreneks 'Elektronisches Musikprojekt"* en annexe.

[53] "Oratorio de Pentecôte"

paramètres physiquement liés devient une nouvelle possibilité offerte au compositeur. Nous avons déjà vu que la connaissance des lois acoustiques influence la réalisation compositionnelle. Ce progrès technique qui permet de découpler les liens naturels entre des paramètres physiques (comme le lien entre hauteur et durée) donne une plus grande ampleur au travail sur les paramètres compositionnels; les manipulations possibles franchissent un nouveau seuil.

C'est une toute autre démarche qu'adopte Alvin Lucier en 1969 dans sa pièce *I'm sitting in a room.* L'acoustique de l'endroit choisi pour réaliser cette pièce devient le « paramètre compositionnel » le plus important. En effet, elle a une forme ouverte et le compositeur invite d'autres musiciens à réaliser leur propre version en suivant un processus simple. Un texte, proposé par le compositeur, ou n'importe quel autre texte, doit être enregistré sur un magnétophone. Cet enregistrement est ensuite diffusé à l'aide d'un second magnétophone et d'un haut-parleur dans la pièce (le local) choisi(e), tandis que les sons ainsi produits sont enregistrés avec le microphone sur le premier magnétophone. Au cours de cette phase, l'enregistrement diffusé est filtré par les caractéristiques acoustiques et les résonances du lieu de diffusion utilisé. Ce processus est ensuite repété un certain nombre de fois : le dernier enregistrement effectué est diffusé à nouveau et enregistré. Ces diverses étapes sont par la suite collées l'une après l'autre. La longueur de l'œuvre finale dépend alors de la longueur initiale du texte et du nombre de répétitions du processus. La voix de plus en plus filtrée perd ses qualités d'origine, est de moins en moins compréhensible; finalement, seul le rythme du discours initial reste audible et les fréquences de résonance du lieu de diffusion deviennent essentielles [LUCIER, 1995 ,pp. 322-325]. Le rôle créateur du compositeur se limite alors à la formulation d'un concept de départ. Le compositeur n'a ensuite plus d'influence sur le processus compositionnel ni sur le résultat sonore. Ce système, basé sur une réflexion sur l'interaction entre un phénomène sonore et l'espace dans lequel il se fait entendre, ne permet pas de prévoir le résultat sonore final. Les paramètres acoustiques ne sont pas controlés par le compositeur, mais ils sont mis en évidence.

Dans le domaine théorique, d'autres approches de classification du sonore, telles les recherches de Simon Emmerson sur le rapport entre matériau compositionnel et perception, ou celles de Denis Smalley sur la spectro-morphologie, se développent à partir des travaux de P. Schaeffer. S. Emmerson établit une classification du matériau sonore en neuf groupes selon leur appartenance à la syntaxe abstraite ou à la syntaxe abstraie, au discours aural ou au discours mimétique. [EMMERSON, 1986, p. 17-39]. Denis Smalley mène une recherche très approfondie concernant la typologie spectrale des événements sonores, leur morphologie, les mouvements à l'intérieur de l'événement sonore et la structuration en relation avec la forme [SMALLEY, 1986, pp. 61-93]. Toutes ces recherches se concentrent sur l'intérieur du son, pour essayer de comprendre les qualités physiques — acoustiques du son et de les comparer avec les effets perceptifs. Elles offrent un fondement à la fois scientifique et musical à notre propre travail concernant l'application de paramètres compositionnels au traitement sonore.

Nous pouvons donc rassembler les grandes lignes de ces trois dernières sous-parties dans les trois points suivants :

- Une solide connaissance des lois physiques musicales et des phénomènes psychoacoustiques est requise pour pouvoir effectuer un travail minutieux sur le son, sans tomber dans les travers d'une manipulation trop globale.

- La notion de paramètres compositionnels est en perpétuelle évolution, suivant la progression des techniques employées et des manipulations possibles.

- En racourci, deux attitudes compositionnelles se manifestent : l'une est guidée par la perception, l'apprentissage empirique des possibilités techniques et des voies permettant de les intégrer dans le processus compositionnel; l'autre part de concepts, utilisant les sons sur support comme vecteurs de ces concepts, sans prendre en compte l'aspect sonore dans un premier temps.

1.5 V*oltage control,* ordinateur et contrôle des paramètres compositionnels

Une difficulté essentielle pour la musique électronique des premières années tient à l'imprécision des machines. Les réglages changent de jour en jour et il peut être très difficile de réaliser avec exactitude le concept défini. C'est avec l'arrivée des synthétiseurs et notamment du *voltage control*, permettant de contrôler la tension des paramètres d'un équipement électronique, que cette situation change. Robert Moog et Donald Buchla développent indépendemment leurs synthétiseurs, commercialisés pour la première fois en 1966 [MANNING, 1993, pp. 117-118]. Tous les modules d'un synthétiseur — oscillateurs, amplificateurs, filtres… — contiennent des paramètres ajustables. Si ces paramètres sont contrôlés par *voltage control,* des boutons rotatifs par exemple, et/ou d'autres moyens de contrôle disposés sur l'instrument agissent comme potentiomètres, réglant la tension électrique parvenant au module concerné. Les claviers sont utilisés de la même manière, transmettant pour chaque touche une tension précise. Ces tensions sont ensuite interprétées par les modules. Les fréquences des oscillateurs, le volume d'amplification ou les fréquences d'un filtre sont ainsi contrôlables.

Pour la première fois, une discrétisation des paramètres pouvait être réalisée. Cette technique, d'abord conçue pour le contrôle de la synthèse, ouvre également la voie vers l'application de paramètres compositionnels aux traitements sonores, car les filtres et modulateurs peuvent également être pilotés par le *voltage control*, et suivre des paramètres bien définis. Avec l'invention au milieu des années soixante des séquenceurs, qui permettent de stocker des paramètres discrets en séquence, changer extrêmement précisément les paramètres au cours du processus de composition est désormais possible.

K. Stockhausen emploie un séquenceur par exemple en 1970 pour réaliser sa pièce *SIRIUS* pour trompette, soprano, clarinette basse, voix de basse et bande à huit pistes, dans laquelle douze mélodies sont utilisées non seulement pour donner le rythme, les amplitudes et les hauteurs aux oscillateurs d'un synthétiseur, mais également pour contrôler les fréquences des filtres par exemple.

L'autre grand changement est l'arrivée de l'ordinateur dans les années cinquante. La relation compositeur-machine se transforme radicalement. Il est dès lors nécessaire de donner des indications précises et formalisées. Cela pousse la recherche musicale dans une nouvelle voie, tournée non seulement vers les sons mais aussi vers la perception, ce qui conduit à étudier la formalisation des données acoustiques à l'aide de l'ordinateur avant de les transformer en paramètres compositionnels. Ce dernier devient un « instrument de réflexion ». La Suite Illiac pour quatuor à cordes, composée de 1956 à 1957 par Lejaren A. Hiller et Leonard M. Isaacson, est la première œuvre entièrement réalisée à l'aide de l'ordinateur - qui donne son nom à la pièce [BATTIER.1995b]. La formalisation de cette œuvre s'est faite en deux étapes. L.A. Hiller et ses collaborateurs appliquent tout d'abord des séries aléatoires aux paramètres hauteurs, durées et dynamiques, limités par des bornes définies. Ils obtiennent ce faisant une « musique arbitraire », selon l'expression de L.A. Hiller. L'ordinateur choisit ensuite parmi ces séquences aléatoires des segments répondants à des règles préalablement définies (ce peut être pour une partie de l'œuvre par exemple les règles contrapunctiques suivies par Palestrina et codifiées par Johann Joseph Fux en 1725 dans son célèbre ouvrage *Gradus ad Parnassum*) [RUSCHKOWSKI, 1998, pp. 266-271]. Une fois les règles programmées en langage informatique, l'ordinateur peut calculer diverses variantes de la même idée compositionnelle, permettant ainsi au compositeur de choisir la variante qu'il préfère parmi les résultats obtenus. La suite Illiac représente la première étape de la naissance de la composition assistée par ordinateur; les méthodes alors utilisées sont encore appliquées aujourd'hui.

I. Xenakis utilise également l'ordinateur pour générer des structures ordonnées avant de les transcrire par la suite manuellement en notation instrumentale. La musique électronique l'intéresse également, et sa première œuvre pour bande *Diamorphoses* (1957) est pour lui l'occasion d'appliquer des principes d'organisation mathématique aux sons concrets.

> « La musique stochastique, introduite par I. Xenakis, est une musique construite sur le principe de l'indéterminisme. Celui-ci est régi par des lois de probabilités telles que les lois de Poisson ou de Laplace-Gauss, qui contrôlent les caractéristiques traditionnelles des

> symboles musicaux comme la durée, l'intensité, le timbre ou la hauteur mais aussi la densité, la vitesse et le degré d'ordre des événements sonores.[54] »

I. Xenakis introduit une méthode de travail radicalement nouvelle en appliquant la stochastique à la musique. Il contrôle des paramètres tels que les hauteurs, la vitesse des glissandi, la dynamique et la densité sonore en utilisant des règles de masses, se trouvant par là-même à contre-courant de la musique sérielle, qui fixe individuellement chaque paramètre pour chaque élément.

D'autres systèmes de composition formalisée se développent par la suite. P. Barbaud développe durant les années cinquante ses premières théories concernant les systèmes génératifs en musique. Grâce à ce système pour développer un matériau musical, Pierre Barbaud réalise en 1959 la première composition algorithmique intitulée *Imprévisible nouveautés (Algorithme 1)* [BATTIER.1995].

En 1964, Gottfried Michael Koenig conçoit son *Project 1*, programme de calcul des structures musicales développé à Bonn. *Project 1*, plate-forme encore très personnelle, a été suivi de *Project 2* en 1970, programme développé à l'institut de *Sonologie* à Utrecht, déjà plus ouvert, contenant différentes routines permettant des calculs aléatoires.

Claude Risset, un des premiers compositeurs/chercheurs à avoir intégré la synthèse sonore dans ses œuvres, construit rigoureusement le son avec *Csound*. Il veut dépasser la simple couleur pour réellement « composer » des spectres; il est maintenant non seulement possible de choisir le son fondamental mais aussi de composer chacun de ses partiels. Cette idée le conduit notamment à créer des sons paradoxaux : le son pour lui est autre chose qu'une identité à sa fondamentale.

Dans son œuvre, le mariage de la formalisation et du traitement est le fruit d'une réflexion approfondie sur ce qu'est l'outil « ordinateur ».

[54] [FATUS, 1989, p.36]

> « L'ordinateur est plus qu'une calculatrice rapide. Ce n'est pas un outil, une machine ou un instrument. C'est plutôt une sorte d'atelier qui permet de sculpter et de construire des outils, machines et instruments très variés. Il permet de travailler d'une façon similaire sur des processus intellectuels et matériels. Il offre des possibilités sans précédent pour représenter et modéliser des situations complexes.[55] »

P. Boulez également voit l'ordinateur comme un appareil dont le rôle va bien au-delà de ses simples pouvoirs de calcul, comme un véritable « instrument de réflexion » sur les bases les plus importantes de l'écriture musicale.

> « S'il y a une chose à laquelle l'utilisation de l'ordinateur nous oblige, c'est bien de réfléchir aux mécanismes mêmes de la composition. Il n'a certainement pas cet unique pouvoir, puisqu'il nous aide également à créer le matériau sonore dans une perspective très différente de celle que nous offre le domaine instrumental.[56]

Dans sa pièce *Repons* pour six solistes, orchestre et traitement sonore en temps réel[57], P. Boulez utilise par exemple des séries de hauteurs composées pour transposer des sons instrumentaux joués par les solistes. Même s'il s'agit ici d'un traitement en temps réel, le lien très étroit établi entre l'écriture instrumentale et les paramètres qui guident la transformation peut devenir une source de réflexion pour développer certaines fonctions de notre bibliothèque « OM-AS », qui permet également de transposer des sons sur des hauteurs tirées d'une mélodie.

Développer un outil pour contrôler des paramètres complexes à gérer dans un processus de synthèse a toujours été une des préoccupation des compositeurs et chercheurs de l'IRCAM. *Formes* est un langage de contrôle pour la synthèse. Il peut prendre en charge l'organisation d'ensembles de données utilisées ensuite avec *Chant* ou le vocodeur de phase. D'autres programmes ont été développés par la suite dans la même ligne - *Crime* (1985-1986), *PreFORM* (1986), *Esquisse* (1988) et finalement *PatchWork* à partir de 1988. Ce logiciel, dont Mikail Laurson a eu l'initiative, est une plate-forme largement utilisée pour formaliser des paramètres compositionnels. Il est possible d'y intégrer de nouveaux concepts grâce à des bibliothèques

[55] C'est nous qui traduisons. Texte original : "The computer is more than a fast calculator. It is not a tool, a machine or an instrument. Rather, it is a kind of workshop which allows to design and build a variety of tools, machines or instruments. It allows to deal in similar ways with intellectual and material processes. It offers unprecedented possibilities to represent and model complex situations." [RISSET, 1992, p. 10]

[56] [BOULEZ, 1981, p. 46]

[57] Pierre Boulez - *Repons*, Universal Edition, London, 1981.

externes[58]. Notre travail personnel de développement cherchant à lier traitement et formalisation commence en 1994 avec le logiciel *PatchWork* avant de continuer avec son successeur *OpenMusic* en 1998. Ce portage a été l'occasion de généraliser ces concepts et de transformer ces outils et routines informatiques développés tout d'abord pour répondre à des attentes compositionnelles personnelles en une bibliothèque publique.

Avant de présenter cette bibliothèque dans la troisième et dernière partie de notre mémoire, nous allons maintenant analyser deux œuvres du répertoire pour étudier plus en détail les paramètres compositionnels utilisés.

[58] Une bibliothèque externe est un ensemble de fonctions propres à un ou plusieurs compositeurs, développées par des compositeurs ou des informaticiens externes à l'équipe qui a créé le logiciel.

2. Analyse des paramètres compositionnels dans deux œuvres du répertoire

La première partie de notre mémoire nous a permis de retracer l'évolution de quelques concepts et méthodes de travail utilisés pour composer avec des sons sur support. Nous allons maintenant étudier d'une façon plus détaillée comment deux compositeurs ont formalisé et appliqué leurs idées au traitement sonore. Nous choisissons deux exemples connus du répertoire qui sont l'occasion d'étudier deux approches différentes.

Nous prendrons comme premier exemple la *Studie 1* de Karlheinz Stockhausen, une de ses premières pièces électroniques du studio de Cologne. La deuxième pièce étudiée sera *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey, réalisée en 1980 à l'IRCAM.

2.1 *Studie 1* de Karlheinz Stockhausen

Composée en 1953 dans le studio de Cologne, cette œuvre fut la première à être réalisée uniquement à partir de sons sinusoïdaux. Nous décrirons ici certains aspects de la démarche adoptée pour réaliser *Studie 1* afin de voir quelles méthodes structurantes peuvent être employées en « musique électronique ».

K. Stockhausen s'était heurté à des difficultés conceptuelles en cherchant à utiliser une série de timbres dans la pièce sérielle pour dix instruments *Kontrapunkte*. Ordonner des timbres instrumentaux suivant une série unidimentionnelle n'est pas possible. La solution envisagée par K. Stockhausen consiste alors à travailler avec des sons les plus purs possibles d'afin de pouvoir contrôler les timbres dans leurs moindres détails pour les soumettre à l'ordre structurant de la série.

En même temps, K. Stockhausen prend en compte les lois psychoacoustiques et définit les fréquences utilisées dans la partie du spectre à laquelle l'oreille est la plus sensible : le « centre de gravitation » des fréquences se situe au milieu du spectre audible. Les rapports intervalliques se

développent à partir de cinq ratios : 12/5, 4/5, 8/5, 5/12 et 5/4. En multipliant la fréquence de 1920 Hz[59] par ces fractions, K. Stockhausen obtient une série de six fréquences (1920, 800, 1000, 625, 1500 et 1200 Hz), chacune devenant le point de départ d'une nouvelle série. Cette méthode donne un total de 36 séries, ordonnées en six groupes.

12 : 5	8 : 5	5 : 4			
	4 : 5	5 : 12			
1920	800	1000	625	1500	1200
800	333	417	260	625	500
1000	417	521	325	781	625
625	260	325	203	488	390
1500	625	781	488	1170	937
1200	500	625	390	937	750
800	333	417	260	625	500
333	138	173	108	260	208
417	173	217	135	325	260
260	108	135	84	203	162
625	260	325	203	488	390
500	208	260	162	390	312
1000	417	521	325	781	625
417	173	217	135	325	260
521	217	271	169	407	325
325	135	169	105	254	203
781	325	407	254	610	488
625	260	325	203	488	390
625	260	325	203	488	390
260	108	135	84	203	162
325	135	169	105	254	203
203	84	105	66	158	127
488	203	254	158	381	305
390	162	203	127	305	244
1500	625	781	488	1170	937
625	260	325	203	488	390
781	325	407	254	610	488
488	203	254	158	381	305
1170	488	610	381	914	732
937	390	488	305	732	586
1200	500	625	390	937	750
500	208	260	162	390	312
625	260	325	203	488	390
390	162	203	127	305	244
937	390	488	305	732	586
750	312	390	244	586	469

Fig. 2.1 Les six groupes des fréquences.

K. Stockhausen se contraint pour des raisons auditives à ne pas descendre en dessous de 66 Hz, et à ne pas monter au-dessus de 1920 Hz pour permettre une claire perception des

[59] C'est approximativement le " si 5 "

hauteurs. Le premier pas du processus compositionnel consiste à agglomérer les fréquences sur la base de la série 4 5 3 6 2 1, ce qui donne des agglomérats de quatre, cinq, trois, six, deux et une fréquence (dans ce dernier cas, la fréquence unique n'est bien sûr plus un agglomérat). L'utilisation de ce processus donne pour la première séquence les six agglomérats suivants:

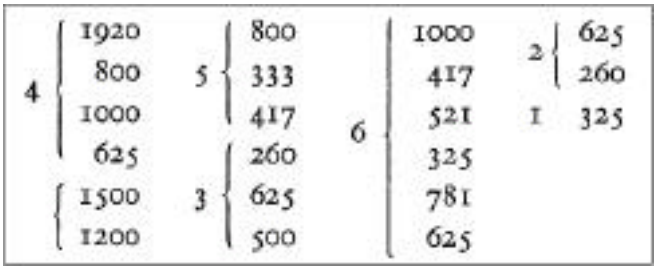


Fig. 2.2 Lecture de la première groupe des fréquences et construction des agglomérats suivant la série 4 5 3 6 2 1.

Ce principe devient la base structurante de toute la pièce, de ses paramètres « microscopiques » à sa forme globale : des sons purs se fondent dans des agglomérats verticaux de fréquences, les agglomérats créent des séquences horizontales, les séquences créent des structures (verticales et horizontales). Baser l'évolution de tous les paramètres sur ce principe sériel unique permet à K. Stockhausen d'atteindre une grande cohérence conceptuelle entre tous les éléments et niveaux de sa pièce.

Les intensités sont également basées sur la série. Plus une fréquence s'éloigne de la bande fréquentielle médium (1000 Hz) vers l'aigu ou vers le grave, plus les sons deviennent faibles[60]. À l'intérieur des agglomérats, les dynamiques suivent une organisation particulière : la fréquence de la première composante détermine la dynamique de référence pour l'agglomérat, les composants suivants sont énoncés chacun 4 dB moins fort. Pour la première colonne de la première série des fréquences, les dynamiques sont les suivantes :

[60] K. Stockhausen a pris en compte les courbes auditives de Fletcher et Munson montrant que l'oreille est la plus sensible autour la fréquence de 1000 Hz. La capacité à percevoir l'amplitude diminue lorsque l'on approche des deux extrémités du spectre.

1920	Hz	n	dB	(référence)
800	Hz	n-4	dB	
1000	Hz	n-8	dB	
625	Hz	n-12	dB	
1500	Hz	n-16	dB	
1200	Hz	n-20	dB	

Les durées sont organisées selon des proportions inverses par rapport aux fréquences. K. Stockhausen décide qu'à un dixième de la fréquence correspond la longueur de la bande : 1920 Hz correspondent à 192 cm. La vitesse de la bande étant de 76.2 centimètres par seconde, la durée totale de défilement est de 2.519 secondes. Pour la fréquence la plus basse, on obtient une durée d'un onzième de seconde (66 Hz = 6,6 cm = 0.087 secondes). K. Stockhausen dote les agglomérats de fréquences d'une enveloppe de dynamique. Ces dernières sont également définies par une série de six possibles, trois formes simples (crescendo, amplitude stable et decrescendo), chacune avec ou sans réverbération [STOCKHAUSEN, 1964, p. 23-36].

L'ensemble des paramètres fréquence, durée et dynamique est alors structuré très rigoureusement suivant les proportions de la série afin que la forme globale et tous les éléments de la composition soient étroitement unis, que chaque paramètre du résultat sonore soit contrôlé et que les concessions habituellement liées à l'utilisation de timbres existants, éléments préstructurés qui n'ont rien à voir avec la série, soient évitées.

Le fait d'avoir composé la pièce avant de la réaliser met en évidence que les paramètres compositionnels ne sont pas tirés d'une expérience sonore, mais obéissent à un système d'organisation totale. Il nous semble difficile de croire que K. Stockhausen pouvait prévoir le résultat sonore final en élaborant son système compositionnel, et ce, d'autant moins que le compositeur n'avait encore aucune expérience dans ce domaine, et ne disposait pas de points de référence. Rester fidèle à cette méthode strictement élaborée devient alors la justification du résultat sonore.

2.2 *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey

La pièce *Mortuos Plango, Vivos Voco* pour bande à huit pistes a été réalisée en 1980 à l'IRCAM. Le but ici n'est pas de faire une analyse complète de la pièce mais de montrer à partir de quelques extraits comment des idées compositionnelles ont été réalisées en appliquant des paramètres au traitement sonore. Deux autres analyses plus détaillées de cette pièce ont par ailleurs déjà été réalisées. La première se trouve dans la thèse de doctorat d'Anastasia Georgaki *Problèmes techniques et enjeux esthétiques de la voix de synthèse dans la recherche et création musicale* [GEORGAKI, 1998], la deuxième a été réalisée par Patricia Dirks et s'appelle *An Analysis of Jonathan Harvey's Mortuos Plango, Vivos Voco* [DIRKS, 1998].

J. Harvey utilise comme matériau sonore le son de la cloche grand ténor de la cathédrale de Winchester et la voix de son propre fils, qui y était choriste depuis 1975. Il se sert du son de cloche à de multiples niveaux : comme matériau sonore utilisé dans la pièce donc, mais aussi comme source de paramètres acoustiques (à partir desquels il dérive ensuite les fréquences et amplitudes de 33 partiels), et enfin comme modèle de resynthèse, utilisé pour créer des sons synthétiques basés sur les qualités spectrales de la cloche.

Le son réel de la cloche qui résonne dans la ville contient une composante que l'oreille perçoit mais qui ne fait pas partie du spectre réel. Un certain nombre des partiels les plus forts étant des multiples d'une fréquence de 347 Hertz, une composante sonore est perçue à cette hauteur. C'est un effet psychoacoustique, et cette composante n'apparaît pas lors de l'analyse spectrale[61]. J. Harvey a dû par conséquent ajouter cette fréquence à la liste des partiels trouvés par l'analyse spectrale. Cela permet d'obtenir un résultat plus proche du son original lorsque celui-ci est resynthétisé.

[61] On appelle ce phénomène une fondamentale virtuelle.

Cette pièce est divisée en huit sections, chacune basée sur la hauteur d‘un des 33 partiels de la cloche[62] (il n’y a donc au total que huit partiels utilisés).

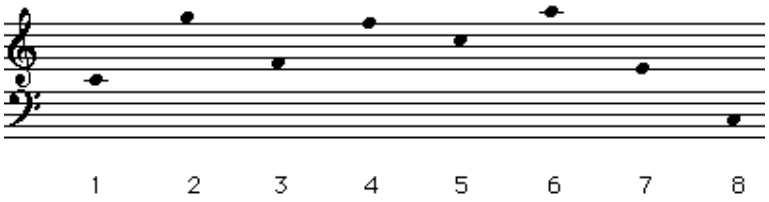


Fig. 2.3 Les partiels choisis comme notes centrales pour les huit sections

La hauteur de ces partiels détermine également la longueur des sections : plus un partiel est grave, plus la section correspondante est longue.

La voix chante des voyelles, mots et parties de phrase tirés de la phrase suivante, inscrite sur la cloche : *Horas Avolantes Numero, Mortuos Plango: Vivos ad Preces Voco*[63]. Nous avons vu précédemment que l‘enregistrement de la cloche pouvait servir pour créer des sons de synthèse basés sur ses qualités spectrales. De la même façon, les sons vocaux peuvent servir de modèle de synthèse : une analyse spectrale permet d‘isoler les formants des voyelles, qui sont par la suite appliqués au spectre de la cloche pour lui donner des qualités vocales.

J. Harvey réalise une composition de timbres, utilisant également leurs décompositions spectrales pour permettre à l’auditeur de faire l’expérience d’une nouvelle écoute, à ‘’l’intérieur’’ du son. Habituellement, l’oreille perçoit les partiels comme un tout : le timbre. Pour J. Harvey, les partiels eux-mêmes deviennent éléments compositionnels : en contrôlant leur apparition et disparition et leurs relations fréquentielles, il amène l’oreille à entendre ces entités séparées. Il essaye par ailleurs de créer une fusion entre les sons de cloche et la voix d‘une part et entre les sons naturels et les sons synthétiques d‘autre part.

[62] Les notes centrales de la cinquième et de la sixième section sont inversées par rapport au schéma défini par le compositeur en 1986 [HARVEY, 1986, p. 182]. J. Harvey a inversé ces deux sections après avoir fini la composition.

[63] C'est nous qui traduisons: "Je calcule les heures passées, je déplore les morts, j'appelle les vivants".

J. Harvey utilise principalement deux environnements informatiques pour réaliser cette pièce: MUSIC V[64] et Chant/Formes[65]. Le premier programme permet entre autre de réaliser des synthèses additives, donc la création de spectres par addition de partiels. Chant/Formes est utilisé pour synthétiser des sons vocaux.

Nos analyses ont été faites à partir d'une copie de la bande à huit pistes. Au cours de cette analyse, nous avons découvert que les hauteurs de la bande à huit pistes diffèrent de 25 cents de la version stéréo[66]. Autrement dit, la version stéréo est un huitième de ton plus aigue que la bande à huit pistes. Cela peut s'expliquer par une légère différence de vitesse entre les magnétophones qui ont servi d'une part pour la production de la pièce et d'autre part pour le mixage sur un support stéréo. Du fait de cette légère transposition, la version stéréo est un peu plus courte que la version originale, qui dure exactement neuf minutes (la différence est de deux secondes). Un autre indice qui renforce cette hypothèse est une analyse spectrale du son de la cloche que nous avons effectué à partir de la bande à huit pistes. Cette analyse retrouve exactement pour le partiel ajouté la fréquence de 347 Hertz dont parle le compositeur en 1981 [HARVEY, 1981, p. 91].

Les références temporelles suivantes renvoient à la version stéréo, plus facilement accessible, tandis que les analyses des fréquences sont faites à partir de sons extraits de la bande à huit pistes.

Comme nous l'avons déjà mentionné, chacune des huit sections de la pièce se base sur une note centrale, issue de l'analyse spectrale de la cloche. Les paramètres compositionnels sont entre autre utilisés pour transposer le son de la cloche grand ténor, transposition qui marque le début de chaque section et permet d'énoncer sa hauteur centrale.

---

[64] Le language Music V est apparu en 1969 et est le fruit des travaux de Max Matthews. Il est encore utilisé dans l'adaptation réalisée par Richard Moore en 1980, Cmusic .

[65] Chant est un moteur de synthèse, spécialisé dans la production de sons vocaux; Formes est un ensemble de fonctions de contrôle.

[66] CD *Computer Music Currents n° 5,* Wergo, Mainz, 1990, plage 5.

Une autre application des paramètres compositionnels apparaît dans la construction des sons complexes qui forment un lien entre chaque section. Ces sons, à la fin des sections 2, 3, 4 et 5, amènent par glissandi la hauteur de la section suivante.

J. Harvey ayant décidé par la suite d'inverser les sections 5 et 6, cette idée compositionnelle n'est plus valable entre les sections 4 à 6. Les hauteurs de la quatrième section glissent vers le « do 4 », note centrale de l'ancienne cinquième section, alors que l'on enchaîne maintenant avec l'''ancienne'' sixième section, qui commence par un « la 4''. Cela est vrai également pour l'actuelle cinquième section - la sixième auparavant - qui glisse à la fin vers le « mib 3 », note centrale de la septième section. La sixième section qui suit maintenant a pour note centrale « la 4 ». Nous avons choisi d'étudier plus en détail la technique des glissandi en utilisant l'exemple de la transition de la deuxième à la troisième section, non affectée par la réorganisation des sections 5 et 6.

> « Le passage d'une modification à l'autre s'est fait par des glissandi de sons sinusoïdaux. Afin d'éviter un parallélisme trop évident, j'ai choisi des tranches de spectres différents comme sons initiaux et finaux, et la note centrale ainsi définie constituait le « pivot » de la modulation.[67] »

La deuxième section est basée sur la note „sol 4", la troisième, sur la note „fa 3". La transition commence à 2.03.5 minutes. Pour ce glissando, J. Harvey n'utilise pas comme point de départ le „sol 4", mais rappelle la hauteur de la première section, „do 3"; il superpose un ''sol 4'', son de cloche resynthétisé, et la voix de garçon chantant la syllabe /pra/ sur le „do 3"[68]. Les hauteurs des partiels de ce son glissent ensuite en dix secondes vers le son de cloche qui marque le début de la troisième section à 2.13 minutes sur le „fa 3". Nous allons maintenant analyser comment le compositeur réalise ce glissando, en trois étapes. Chaque étape se trouvant sur une piste différente de la bande originale, nous avons pu les analyser chacune séparément, ce qui n'est pas possible avec la version stéréo.

---

[67] [HARVEY, 1991, p. 460]

[68] Ce mémoire est accompagné d'un CDRom contenant des exemples sonores et la bibliothèque pour *OpenMusic*. La partie audio peut être écoutée sur une platine laser. Pour l'exemple de cette transision (extrait du mixage stéréo entre 2.03.5 minutes et le début de la section à 2.13 minutes), se référer à l'annexe 1, exemple 1.

L‘extrait commence par un enregistrement vocal non traité, son chanté de la syllabe /pra/ sur la hauteur „do 3“[69]. En examinant le spectre de ce son, nous constatons que les partiels 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 9 sont les plus forts car leurs fréquences correspondent aux formants principaux de la voyelle /a/.

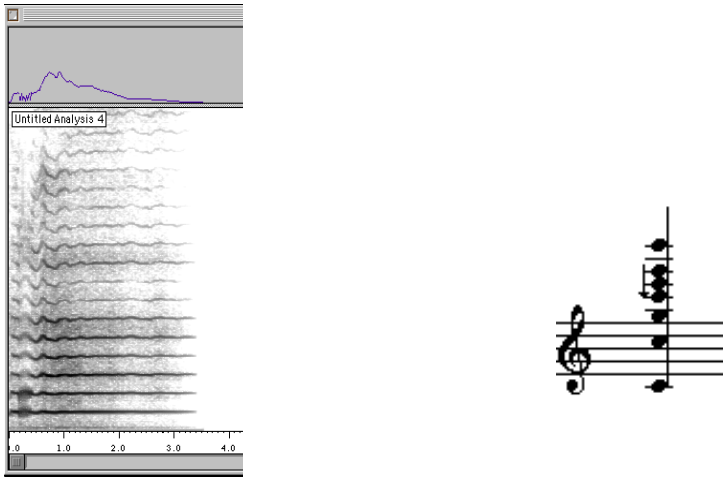


Fig. 2.4 Le spectre de la voyelle /pra/ chantée sur le « do 3 » et la notation des partiels 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 9.

Comme le compositeur cherche à modifier la fréquence de chaque partiel individuellement pour que chacun rejoigne les fréquences des partiels principaux de la cloche, il ne peut pas utiliser une transposition, car elle transposerait tous les partiels du son original de façon parallèle. J. Harvey a besoin d‘un traitement pouvant décomposer le son en entités correspondant à chaque partiel avant de le recomposer, une fois les fréquences de chaque composant modifiées. Un tel traitement, possible aujourd‘hui en employant le vocodeur de phase comme nous allons le voir dans la troisième partie de notre mémoire, n‘était pas réalisable avec les moyens informatiques alors disponibles. J. Harvey trouve une solution en mêlant la voix originale à des sons de synthèse qui simulent la couleur de la voix originale.

Immédiatement après la fricative /pr/, J. Harvey mixe le son de la voyelle /a/ avec un son synthétique qui débute sur les hauteurs précises des partiels 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 9 du son vocal

[69] Voir annexe 1, exemple 2.

initial avant que ces partiels ne commencent un glissando. De plus, J. Harvey ajoute un partiel à 693 Hertz qui n'existe pas dans le spectre de la voix et qui va servir par la suite comme hauteur « pivot »[70].

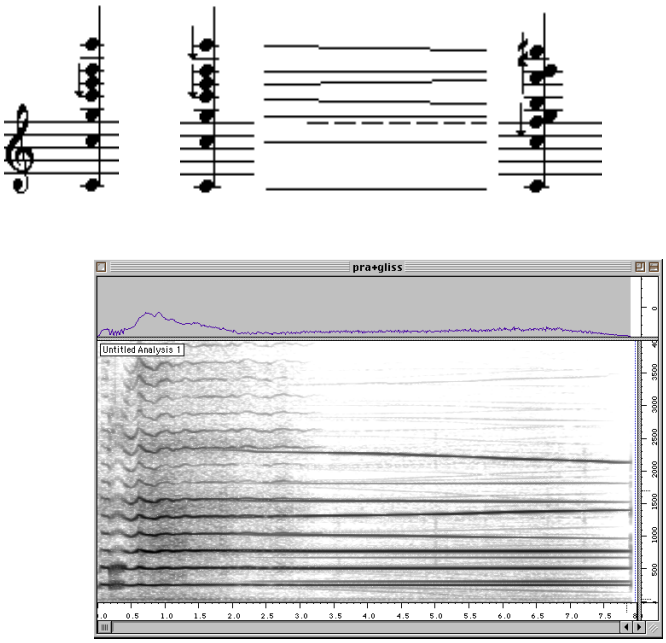


Fig. 2.5 Passage de la silabe /pra/ au glissando synthètique.

Ce son synthétique est très pur, sans vibrato; c'est un contraste voulu avec la qualité sonore de la voix. Mais comme le son original de la voix est maintenu jusqu'à la minute 2.05 pour disparaître ensuite complètement durant deux secondes, ce passage du son naturel au son synthétique se fait progressivement[71]. On entend le glissando synthétique seul durant deux secondes avant qu'à la minute 2.09 un autre son de synthèse commence un glissando. Ce son, également une synthèse de partiels purs, a une toute autre qualité sonore, car J. Harvey introduit un vibrato différent pour chaque composant de ce son tout en introduisant des harmoniques sur les partiels en glissando, comme on peut le voir dans le sonagramme de la figure 2.6.

[70] Voir annexe 1, exemple 3.
[71] Voir annexe 1, exemple 4.

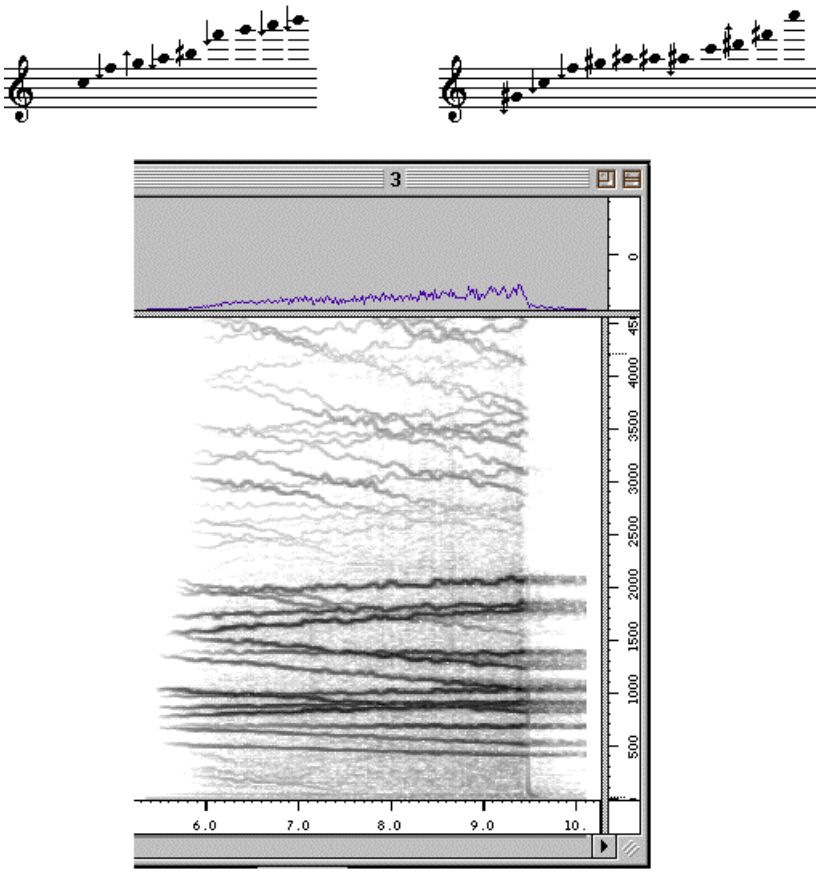


Fig. 2.6 Deuxième glissando: les hauteurs de départ et d'arrivée sont présentées en notation arpégée pour faciliter la lecture. Le sonagramme montre également les harmoniques plus aiguës.

Comme le sonagramme le montre clairement, le glissando ne se fait pas d'une façon parallèle. Il y a des composants dont les fréquences montent alors que d'autres descendent, tandis que la fréquence de la note « pivot » ne change pas (troisième partiel inférieur dans la figure 2.6)[72].

Ce processus de croisements des partiels, l'application de vibratos individuels aux composants et le fait de créer des harmoniques sur les sons purs permettent à J. Harvey d'arriver à une sonorité de chœur, et ce, de façon d'autant plus convaincante que ce glissando est réverbéré

[72] Voir annexe 1 : l'exemple 5 est le glissando synthétique simulant une sonorité de choeur; l'exemple 6 est le passage du premier glissando sans vibrato au deuxième glissando.

(cela facilite la fusion des composants d'abord entre eux puis avec le spectre de la cloche qui débute à 2.13 minutes). Les partiels du glissando s'arrêtent brusquement à 2.13 minutes; néanmoins, leurs fréquences résonnent du fait de la réverbération et se mêlent avec les fréquences des partiels de la cloche[73].

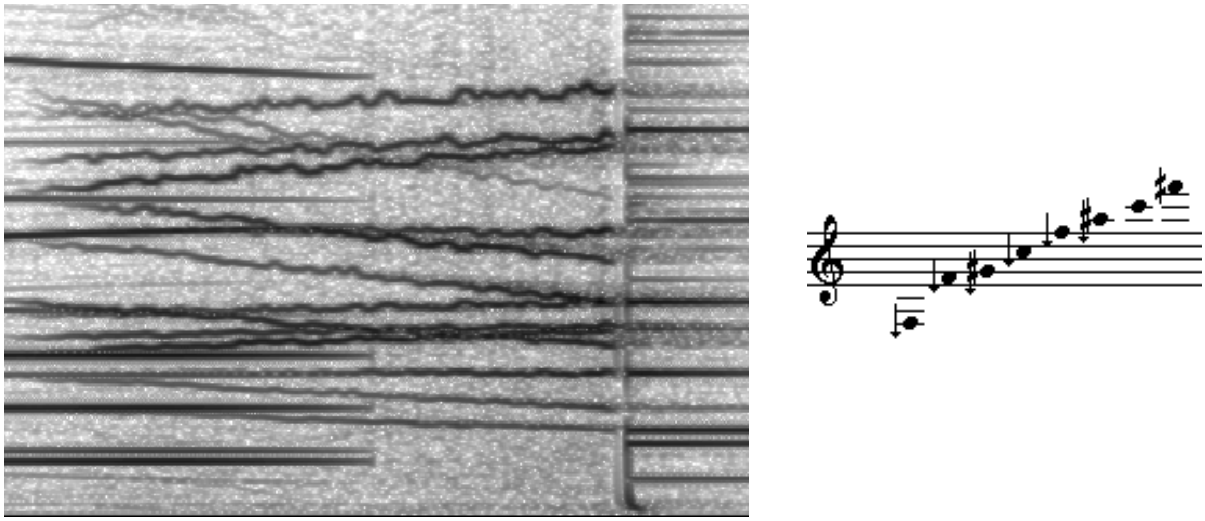


Fig. 2.7 Zoom sur le premier et deuxième glissando, ainsi que sur le début du spectre de la cloche. Présentation des partiels les plus forts de la cloche.

En remixant ces trois étapes, J. Harvey obtient le glissando recherché, allant du spectre de la voix vers le spectre de la cloche[74].

En comparant l'approche de K. Stockhausen avec celle de J. Harvey, nous constatons que ces deux compositeurs travaillent sur le contenu spectral. K. Stockhausen cependant part d'un travail sur l'idée et applique un système de structuration totale aux sons sinusoïdaux, tandis que J. Harvey, utilisant des sons naturels, resynthétise à partir de sons sinusoïdaux des spectres faisant un lien entre les sons de la cloche et de la voix. Pour J. Harvey, la synthèse additive devient un outil permettant de déterminer les fréquences de partiels simulant des spectres naturels. Il part donc de sons existants transformés en modèles pour la resynthèse. Ces modèles deviennent eux-mêmes

[73] Voir annexe 1 : l'exemple 7 est la cloche transposée sur le "fa 3"; l'exemple 8 est le passage du glissando de choeur à la sonorité de la cloche.

[74] Voir annexe 1 : exemple 9 est le mixage des trois étappes.

objets de transformation. Par cette méthode, il obtient un champ sonore allant d'une part de la sonorité de la cloche aux sons vocaux et d'autre part des sons naturels aux sons synthétiques. Les paramètres compositionnels employés par K. Stockhausen sont issus intégralement de la série généralisée qui structure sa pièce tandis que ceux employés par J. Harvey trouvent leur source dans l'analyse des spectres des sons utilisés. Il s'agit donc d'un travail de formalisation des paramètres acoustiques visant à les intégrer dans une pensée compositionnelle affranchie des lois sonores naturelles.

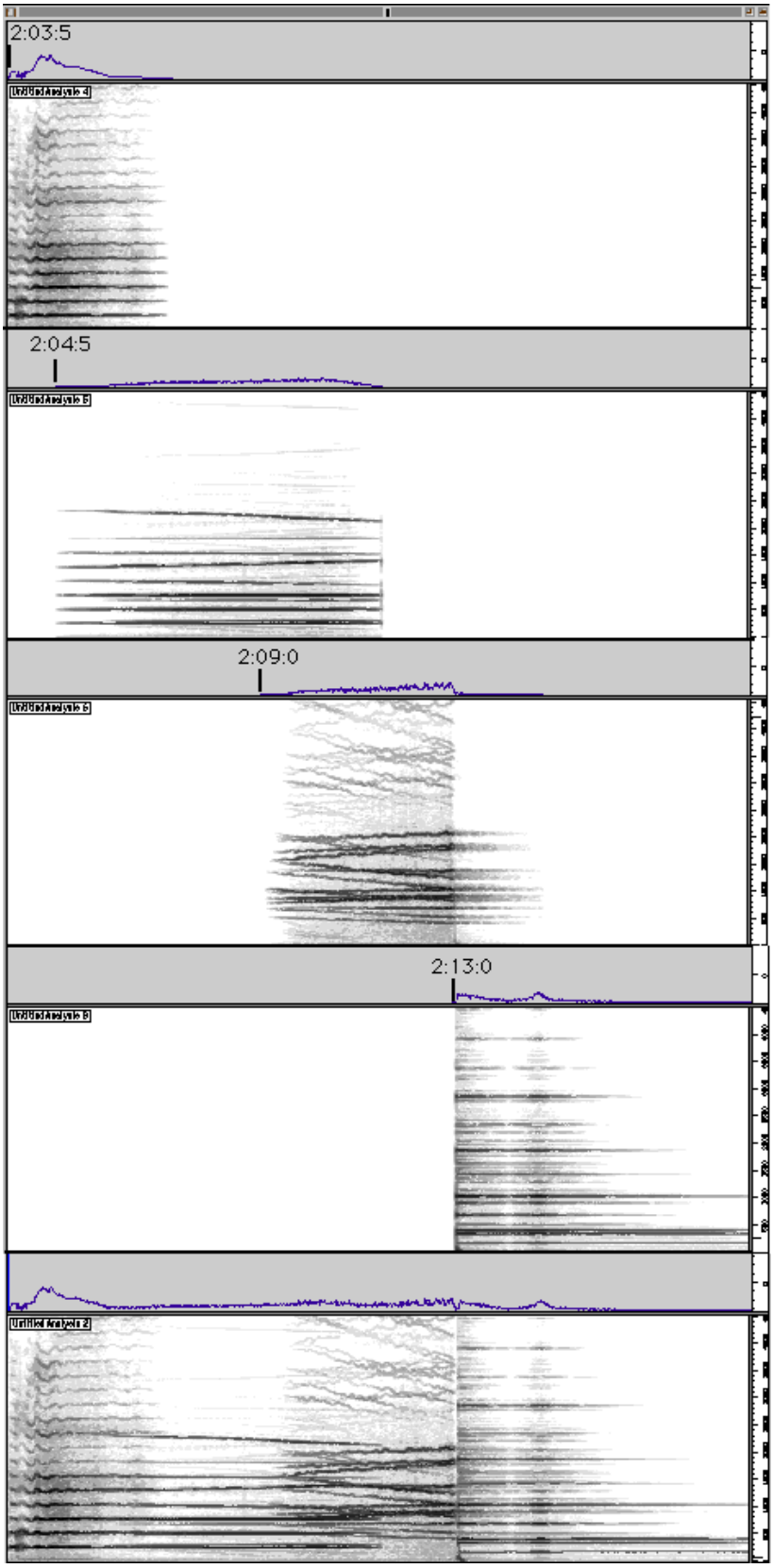


Fig. 2.8 De haut en bas, sonagramme des trois étapes de transision séparées, puis spectre de la cloche et mixage final.

3. Application informatique : la bibliothèque « OpenMusic - AudioSculpt »

Nous avons donc passé en revue dans la première partie quelques courants compositionnels importants utilisant des sons et bruits stockés sur support, puis présenté dans la seconde partie deux approches significatives. Nous allons étudier maintenant comment un lien peut être établi entre le monde de la composition assistée par ordinateur et le traitement sonore en traduisant les paramètres utilisés par la CAO (la hauteur, la durée, la dynamique ou l'harmonie par exemple) par leurs correspondances dans le domaine du traitement sonore (fréquence, durée, amplitude, succession de bandes de filtres...).

Travailler dans les deux domaines à la fois en tant que compositeur et en tant qu'en enseignant nous a permis d'approfondir notre recherche sur le contrôle des paramètres du traitement sonore, notamment pour réaliser des pièces mixtes dans lesquelles nous cherchons à établir un lien étroit entre écriture instrumentale et réalisation de la partie électroacoustique. L'outil informatique proposé rend désormais possible qu'une seule et même mélodie soit jouée par un instrument et utilisée pour fournir des paramètres commandant l'évolution d'un filtre ou d'une transposition par exemple. Si on lance le son préparé sur support alors que l'instrument commence à jouer, ils peuvent l'un et l'autre obéir aux mêmes règles d'écriture. Un développement plus poussé de ce procédé peut maintenant être envisagé pour permettre non pas seulement un traitement des sons travaillés en « parallèle » avec la mélodie de l'instrument, mais aussi l'élaboration de relations pluri-dimensionnelles entre écriture instrumentale et son sur support.

La formalisation de cette bibliothèque sera réalisée grâce au logiciel *OpenMusic*. Développé à l'IRCAM[75] par l'équipe « représentations musicales », *OpenMusic* est le successeur du programme *PatchWork*[76]. C'est un logiciel écrit en *CommonLisp* pour *Macintosh* qui permet de

[75] „Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique" à Paris.

[76] *PatchWork* a été dévoloppé par Mikael Laurson, Camilo Rueda et Jacques Duthen ;*OpenMusic* par Gerard Assayag et Carlos Agon, Olivier Delerue et Camilo Rueda, en étroite collaboration avec de nombreux compositeurs tels Tristan Murail, Kaija Saarihao, Jean-Baptiste Barrière, Claudy Malherbe, Marc Battier, Magnus Lindberg, Joshua Fineberg, Jacopo Baboni-Schilingi, Mikhail Malt. Pour plus d'information sur les logiciels *Patchwork* et *OpenMusic*, se référer aux publications

manipuler des structures musicales symboliques. Doté d'un grand nombre de fonctions et d'éditeurs graphiques, offrant également la possibilité d'élargir son environnement par le biais de bibliothèques externes écrites en *CommonLisp*, *OpenMusic* représente un environnement pour la composition assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé par des compositeurs en France et à l'étranger.

La partie traitement sonore sera effectuée avec le programme *AudioSculpt*, logiciel d'analyse et de synthèse, basé sur le *vocodeur de phase*[77]. Également le fruit de recherches effectuées à l'IRCAM, il a été développé par un grand nombre de programmeurs successifs[78]. Il possède une interface graphique puissante qui permet de visualiser les analyses effectuées, essentiellement sous forme de sonagrammes. Plusieurs types d'analyses et de traitements peuvent être réalisés — analyse spectrale, recherche de la fréquence fondamentale, analyse des partiels, analyse de l'évolution rythmique, transposition, filtrage, dilatation et compression temporelles, pour n'en nommer que quelques-uns.

Un lien peut être effectué entre les deux programmes *AudioSculpt* et *OpenMusic* grâce à la bibliothèque « OM-AS » développée par l'auteur. Elle a été mise à la disposition des membres du « Forum »[79] de l'IRCAM pour la première fois en novembre 1998, et une mise à jour a été faite au mois d'avril 1999. Elle a depuis été utilisée par les étudiants de la classe de composition informatique tenue au cours du Festival Bartok en Hongrie, par les participants à l'Académie d'été de l'IRCAM et par les compositeurs du Cursus d'informatique musical à l'IRCAM ; la compositrice américaine Ketty Nez, dont certaines méthodes de travail seront analysées par la suite, a notamment beaucoup travaillé avec cette bibliothèque.

Ces dernières années, plusieurs compositeurs ont conçu et développé en étroite

---

suivantes : [MALT,1993a], [MALT,1993b], [BABONI-SCHILINGI,1996].

77 Pour l'explication de l'expression vodoceur de phase, voir chapitre 3.1.2

78 Notamment Chris Rogers, Gerhard Eckel, Philippe Depalle, Xavier Rodet, Gilles Poirot, Emmanuel Fléty, Peter Hannape, Stefania Serafin et Alberto Ricci.

79 Le " Forum " réunit les utilisateurs des logiciels de l'IRCAM et leur propose outils et services informatiques tout en essayant de favoriser les échanges entre eux.

collaboration avec des chercheurs et des programmeurs des outils informatiques permettant de formaliser et de contrôler des concepts compositionnels. Magnus Lindberg par exemple est à l'origine de la bibliothèque *PWConstraints*[80] pour *PatchWork*, Antoine Bonnet a conçu la bibliothèque *Situation*[81] et Marco Stroppa travaille actuellement sur une bibliothèque pour *OpenMusic* qui permettra de contrôler la synthèse[82]. Notre travail va dans la même direction — développer un outil de formalisation, mais cette fois-ci destiné à être appliqué au traitement sonore.

Notre travail se base uniquement sur les outils développés à l'IRCAM. Néanmoins ces concepts restent valables dans d'autres environnements de la composition assistée par ordinateur, *CommonMusic-Stella* de Rick Taube par exemple, ou d'autres programmes de traitement sonore tels *Csound* ou *SuperCollider*. Ces possibilités mériteraient d'être approfondies bien au-delà de ce que nous pouvons faire dans le cadre de ce mémoire.

L'équipe « représentation musicale » à l'IRCAM sous la direction de Gérard Assayag avait déjà développé la bibliothèque *repmus* permettant de transférer des données d'analyse rythmiques et spectrales d'*AudioSculpt* vers *PatchWork* ou *OpenMusic*, afin de fournir des éléments pour l'écriture instrumentale.

> « En effet, nous nous situons dans un cadre de production et de composition dans lequel on suppose que le musicien, partant d'un signal sonore (enregistrement, signal synthétisé) dont il désire se servir comme matériau générateur, va, à l'aide d'un ensemble de procédures combinant automatisme et interaction, en extraire des informations musicales qui seront pour lui « nécessaires et suffisantes » pour constituer une trame à la fois mélodique, harmonique, rythmique et dynamique, représentable dans le cadre de la notation instrumentale[83]. »

Tristan Murail par exemple a utilisé dans sa pièce *Esprit des Dunes* l'analyse spectrale d'un son de trompette tibétaine pour en tirer le matériau musical orchestral ainsi que les données pour la synthèse. On pourrait également citer Gérard Grisey, qui base la première partie de sa pièce

---

[80] *PWConstraints* est un moteur de calcul developpé en collaboration avec Mikhail Laurson qui permet la composition par règles.

[81] *Situation* est une autre approche de la composition par règles aussi puissante que *PWConstraints*. Programmé d'abord pour *Patchwork* par Camilo Rueda, elle a été recamment portée sur OpenMusic.

[82] Ce travail est réalisé en collaboration avec Carlos Agon.

[83] [HANAPPE&ASSAYAG, 1998, p. 200]

Partiels sur le spectre harmonique du « mi 1 » d'un trombone, et utilise dans *Modulations* l'analyse d'un son de cymbale pour en dériver l'évolution de l'amplitude globale de la pièce et pour l'appliquer aux instruments.

Le processus compositionnel se fait donc suivant le cycle : « timbre — analyse — paramétrisation — notation ». À partir des années soixante-dix, les compositeurs de musique spectrale ont intégré les phénomènes acoustiques dans leur écriture instrumentale. A l'inverse, la bibliothèque « OM-AS » permet de sculpter des sons en leur appliquant des paramètres formalisés. Elle permet aussi d'employer d'autres modèles pour générer le matériau sonore. Le transfert des données peut se faire dans deux sens, soit en partant d'un son existant, soit en appliquant des paramètres issus de processus compositionnels à un son artificiel. Ces deux méthodes peuvent être schématisées par les deux chaînes suivantes :

« timbre — analyse — paramétrisation — possibilité de modeler et de changer ces paramètres — création d'un fichier de paramètres destiné au traitement sonore — application de ces paramètres a un son » dans le premier cas,

« génération de paramètres destinés au traitement sonore — application de ces paramètres au son » dans le deuxième cas. Les données initiales n'étant pas issues d'une analyse préalable, le compositeur peut les générer grâce à n'importe quel processus formalisé.

En combinant CAO et traitement sonore il devient donc possible de sculpter des sons et des bruits en suivant des règles compositionnelles.

Quelle que soit l'approche envisagée — composition spectrale ou application de paramètres compositionnels aux sons — il est impossible d'utiliser ces processus sans une connaissance approfondie de l'acoustique. En effet, travailler à partir de l'analyse d'un spectre ne garantit pas que la « traduction » de ces composants dans une orchestration sonne bien « par défaut ».

On se heurte à la même difficulté dans le cas de l'application de paramètres formalisés aux sons. Si nous appliquons à un son des paramètres de traitement sonore issus d'un processus ou d'un algorithme formalisé, le résultat sonore ne dépendra ni uniquement du son source, ni uniquement des paramètres utilisés, mais d'une interaction entre les deux. Comme dans le cas de la musique spectrale donc, l'intervention du compositeur doit permettre au fur et à mesure de raffiner les résultats obtenus.

3.1 Le traitement sonore

Dans cette première sous-partie, nous allons décrire quelques aspects techniques d'analyse et du traitement sonore utilisant le vocodeur de phase car tous les traitements appliqués par la suite utiliseront cette technique.

3.1.1 Le vocodeur de phase

Le vocodeur de phase (*phasevocoder*[84].) est une application informatique qui calcule le spectre d'un son en appliquant le théorème de Fourier. L'analyse spectrale transforme le son en une suite d'analyses successives : les *spectres à court terme*. Un *spectre à court terme* nous donne une grille de bandes de fréquences équidistantes. Les fréquences de cette grille sont fixes et l'algorithme cherche les amplitudes et phases correspondant à chacune de ces bandes (*frequency bins*). L'analyse complète d'un son consiste en une suite de *spectres à court terme*.

[84] Une première implémentation du *phase vocoder* a eu lieu au laboratoires *UCSD's Computer Audio Research Lab (CARL)* sur un ordinateur VAX 11/780. [DOLSON 1989, p. 108]

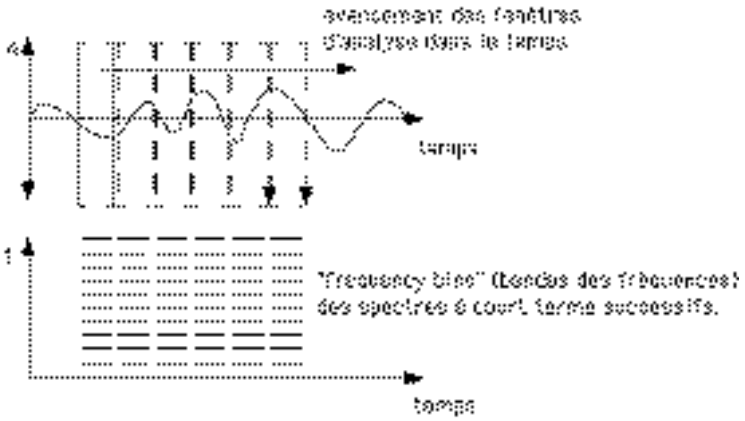


Fig. 3.1 Le fontionnement schématique de l'analyse spectrale.

Durant l'analyse, un fragment du son est isolé (image supérieure de la figure 3.1). L'analyse est appliquée à cet extrait, ce qui donne un *spectre à court terme* (image inférieure de la figure 3.1). En avançant dans le temps, l'analyse produit le spectre suivant, et ainsi de suite. Ces *spectres à court terme* contiennent des valeurs d'amplitude et de phase à l'intérieur d'un nombre fixe de bandes de fréquence allant de 0 Hz à SR/2[85]. Pour rendre notre démarche plus compréhensible, nous décrirons cet algorithme d'une façon schématique et ne rentrerons pas dans les questions de fenêtrage ni de superposition des fenêtres.

Durant cette étape de l'analyse, aucune information du son original n'est perdue ; il est donc possible de synthétiser à nouveau le son original à partir de l'analyse[86]. [DOLSON 1989, p. 105].

3.1.2 Le logiciel AudioSculpt

Le logiciel *AudioSculpt* est une interface graphique du programme *SVP*[87]. Il sert à visualiser des analyses et à contrôler des traitements sonores. Nous ne citerons ici que quelques analyses possibles qui seront utilisées dans la suite de notre travail[88].

[85] La moitié de la fréquence d'échantillonnage.

[86] Nous ne pouvons pas dans les limites de ce travail expliquer tous les artefacts introduits par la technique d'analyse et de resynthèse et nous bornons à constater qu'un son analysé et resynthétisé ne pert pas en qualité.

[87] Super vocodeur de phase, développé à l'IRCAM.

[88] Pour une description exhaustive des analyses possibles avec le logiciel AudioSculpt, se référer au manuel d'utilisation [HANAPPE, 1996].

Le sonagramme permet de visualiser des analyses spectrales selon deux axes. L'axe des abscisses, représentant le temps, montre la succession des *spectres à court terme* et l'axe des ordonnées, représentant les fréquences, montre les *frequency bins* équidistants avec leurs amplitudes respectives, exprimées par les différentes nuances de gris.

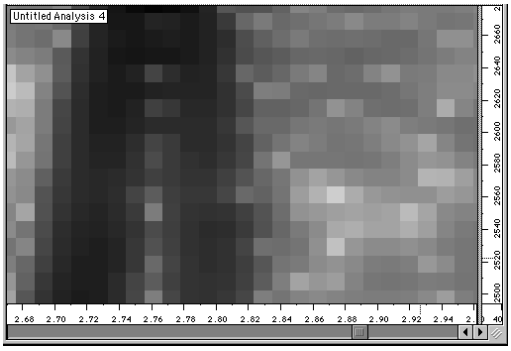


Fig. 3.2 Zoom du sonagramme qui montre sur l'axe des abscisses les pas discrets des spectres à court terme dans le temps et sur l'axe des ordonnées les bandes des fréquences à l'intérieur de chaque sprectre à court terme.

3.1.3 Quelques opérations courantes d'analyse sonore utilisant AudioSculpt

3.1.3.1 L'analyse de la fondamentale

L'analyse de la fondamentale consiste à chercher dans un spectre « quasi-harmonique » la fréquence la plus basse, base du spectre. Cette fréquence fondamentale, ou premier harmonique, correspond au mode de vibration le plus bas dans un médium oscillant et sa fréquence peut varier dans le temps. Deux formes de représentation de cette analyse sont possibles, soit en traçant un trait dans le sonagramme, soit sous forme d'un fichier texte présentant deux colonnes : temps et fréquence.

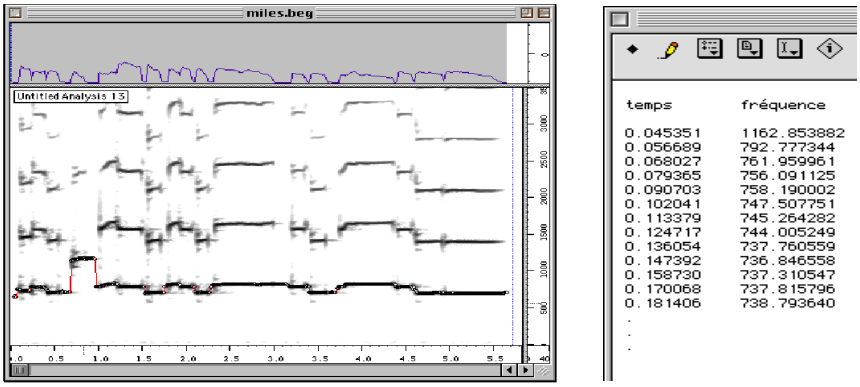


Fig. 3.3 Dessin de la fréquence fondamentale représentée par un trait dans le sonagramme et sous forme de fichier texte présentant le résultat de l'analyse en deux colonnes (temps et fréquence).

3.1.3.2 L'analyse des marqueurs

L'analyse des marqueurs consiste à trouver dans le sonagramme les moments de changement rapide du spectre [HANAPPE, 1995]. À chacun de ces changements, on suppose qu'un nouvel événement sonore apparaît. Les marqueurs peuvent par exemple indiquer l'attaque d'une note. Nous allons utiliser cette fonction pour analyser le rythme des événements sonores à l'intérieur d'un fichier son. Les temps absolus des marqueurs s'exportent également sous forme de fichiers textes.

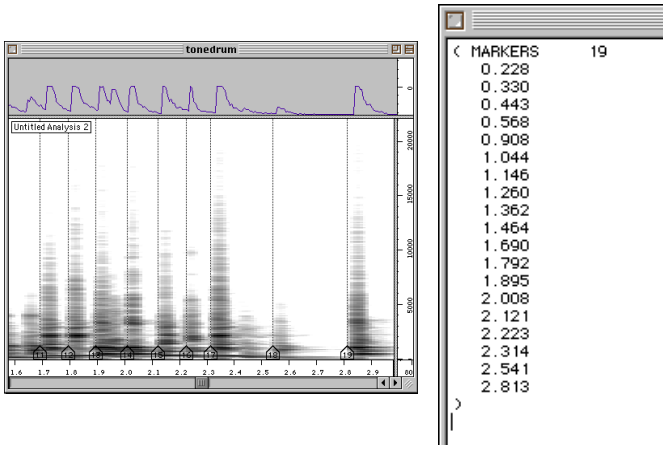


Fig. 3.4 Les marqueurs trouvés et affichés dans le sonagramme et le fichier texte contenant les temps absolus de ces marqueurs.

3.1.3.3 L’analyse des partiels

L’analyse des partiels permet de retracer l’évolution des zones d’énergie et les représente sous forme de traits dans le sonagramme. Cette analyse est également exportable par fichiers textes.

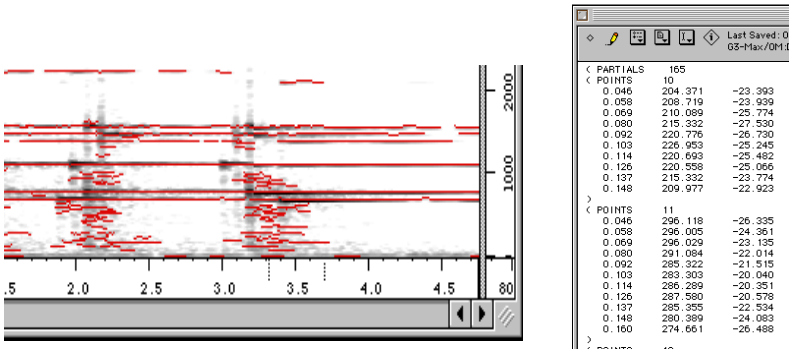


Fig. 3.5 Les partiels trouvés et affichés dans le sonagramme et le fichier texte contenant leurs moments d’apparition et de disparition ainsi que leur évolution en fréquence et en amplitude.

Il est possible d’extraire des données propres à la morphologie des sons employés en utilisant ces analyses dont les valeurs seront sauvegardées sous forme de fichiers textes. Ces fichiers sont lus et interprétés par les fonctions de notre bibliothèque avant d’être formalisés et traduits en paramètres de traitement.

3.1.4 Quelques opérations courantes de traitement sonore utilisant AudioSculpt

Nous ne décrirons pas non plus dans ce chapitre tous les traitements possibles, mais nous nous concentrerons sur ceux utilisés par la bibliothèque « OM-AS ».

Tous les traitements s’appliquent aux données des *spectres à court terme.* La première étape consiste à calculer ces représentations spectrales par l’analyse. Les données de ces représentations seront ensuite modifiées pour finalement resynthétiser un fichier son.

Les *spectres à court terme* présentant l'information des fréquences séparées de leurs informations temporelle, deux types de transformation deviennent possibles : altération des fréquences et altération de la durée.

3.1.4.1 La transposition et la dilatation/compression temporelles

La transposition nous permet de changer la hauteur d'un son. La hauteur est liée au paramètre physique de la fréquence, qui elle-même se base sur le temps. Plus précisément, la fréquence est la réciproque d'une période. Le changement de la vitesse de lecture d'un son stocké sur support par rapport à la vitesse d'enregistrement affecte la hauteur de ce son. En utilisant le vocodeur de phase, il nous est possible de séparer temps et fréquence.

Etudions tout d'abord ce phénomène en prenant l'exemple de la dilatation et de la compression temporelles. Si, au cours de la resynthèse, la même durée pour chaque *spectre à court terme* est utilisée que durant l'analyse, nous obtiendrons la durée originale du son. Si au contraire la résynthèse des spectres successifs contenant les informations spectrales (la hauteur du son) prend pour chaque *spectre à court terme* moins de temps, il en résulte une compression de la durée, mais les fréquences resynthétisées ne changent pas, seule leur apparition dans le temps a changé. La résynthèse avec une succession plus lente a pour résultat une dilatation temporelle du son.

S'il est possible de changer la durée d'un son sans affecter sa hauteur, l'inverse, le transposer sans affecter sa durée, est également réalisable. En supposant que la transposition se fait à l'octave supérieure, on peut expliquer ce processus par l'application d'une dilatation double de la durée originale, et par une lecture de l'échantillon sonore deux fois plus rapide. Ainsi, la durée du son n'a pas changé par rapport à la durée originale et la hauteur est octaviée.

3.1.4.2 Le band filter

En appliquant le vocodeur de phase, nous pouvons très précisément déterminer quelles bandes de fréquences dans le spectre seront affectées. Une fois que la suite des *spectres à court terme* a été calculée, le filtre change les valeurs des amplitudes dans les *frequency bins*.

Le *band filter* garde ou rejette l'énergie dans la bande de fréquence spécifiée. Les données décrivant les paramètres pour le *band filter* peuvent changer dans le temps. Il n'est pas possible de changer l'amplitude des bandes. Soit l'énergie originale à l'intérieur d'une bande est conservée, soit elle est complètement effacée.

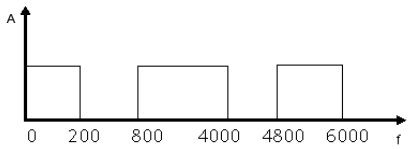


Fig. 3.6 Suite des bandes gardant ou rejetant l'énergie. Ces paramètres décrivent un filtre qui garde les fréquences entre 0 et 200 Hz, entre 800 et 4000 Hz et entre 4800 et 6000 Hz. Les autres parties du spectre seront effacées.

.

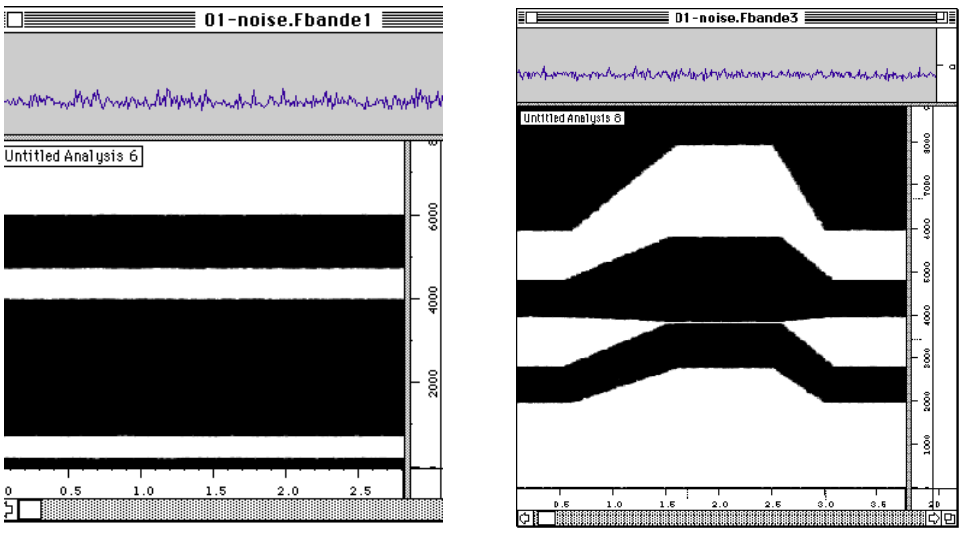


Fig. 3.7 À gauche, le résultat d'un bruit blanc filtré par le *band filter* dont les paramètres sont constants dans le temps. À droite, les paramètres décrivant l'évolution du filtre changent.

3.1.4.3 Le *breakpoint filter*

Le *breakpoint filter* nous permet de définir également la valeur d'amplitude. Les paramètres sont présentés sous forme de points dans le plan amplitude/fréquence.

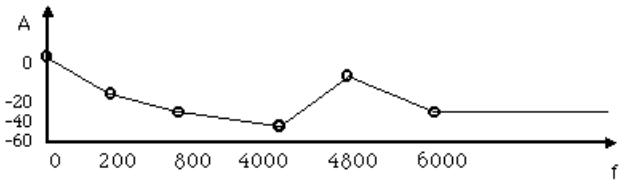


Fig. 3.8 Ces six points sont définis par les valeurs 0 Hz/0 dB ; 200 Hz/-10 dB ; 800 Hz/-20 dB ; 4000 Hz/-40 dB ; 4800 Hz/-5 dB ; 6000 Hz/-20 dB. Ces points sont connectés par des segment linéaires.

3.2 La bibliothèque « OpenMusic — AudioSculpt »

La bibliothèque « OM-AS » est un ensemble de fonctions formant un lien non seulement entre deux programmes, mais aussi entre deux approches compositionnelles distinctes, comme nous le verrons dans les chapitres suivant. Écrite en CommonLisp, cette bibliothèque s'intègre comme une bibliothèque externe dans le logiciel *OpenMusic*. L'échange des données entre *AudioSculpt* et *OpenMusic* s'effectue via des fichiers texte.

L'utilisation de la bibliothèque offre deux paradigmes de travail. Il est possible soit de calculer des données grâce à des processus d'écriture formalisés, puis de transformer ces données à l'aide de la bibliothèque en paramètres de traitement, soit de partir de l'analyse d'un son existant. Dans le premier cas, on applique par exemple une mélodie à une transposition ou à l'évolution d'un filtre. Dans le deuxième cas, les analyses faites avec *AudioSculpt* peuvent être lues, interprétées et transformées à l'aide de la bibliothèque pour obtenir des fichiers de paramètres. Il est ainsi possible par exemple de calculer l'évolution d'un filtre par rapport à la fréquence fondamentale d'un son.

Ces fichiers de paramètres sont ensuite repris avec *AudioSculpt* pour contrôler certains traitements sonores, qui peuvent généralement être dynamiques, (autrement dit, leurs paramètres peuvent changer au cours du traitement). La description de ces paramètres est donnée par des fichiers texte, dont le format dépend du type de traitement. Pour obtenir des résultats complexes, ces fichiers peuvent facilement prendre une taille considérable. L'édition de ces fichiers est alors une tache lourde et difficile. Le langage CommonLisp étant capable de créer des fichiers texte, il est alors utilisé pour générer ces fichiers de paramètres et pour reformater les données musicales selon la norme nécessaire pour le traitement en question. L'utilisateur peut obtenir diverses variantes d'un ensemble de données en manipulant quelques paramètres pertinents, sans avoir à entrer manuellement ces longs fichiers.

La bibliothèque « OM-AS » contient beaucoup de fonctions. Le but ici n'est pas de faire un manuel d'utilisation[89], mais de choisir les fonctions les plus parlantes pour montrer comment l'écriture formalisée s'applique au domaine du traitement sonore. Nous sommes conscients que les chapitres suivants sont très techniques. Mais ne pas démontrer la réalisation exacte des idées musicales empêche de comprendre leur poids artistique.

3.2.1 Le lien entre la formalisation des hauteurs et la transposition d'un son

Comme nous l'avons vu dans la première partie à travers l'exemple des instruments *intonarumori* ou du *phonogène*, la manipulation des hauteurs est très importante. De plus, il était à l'époque assez facile de jouer sur ce paramètre grâce aux tourne-disques et aux magnétophones, par simple accélération ou ralentissement de la vitesse de lecture. Mais ces accélérations et ralentissements entraînaient toujours un changement de la durée du son. Grâce à l'utilisation du vocodeur de phase, il est maintenant possible de changer la hauteur d'un son sans affecter sa longueur. Ce qui nous intéresse ici est la possibilité de faire un lien entre l'écriture formalisée et ce type de traitement.

3.2.1.1 La transposition par mélodie

Dans ce chapitre nous allons étudier comment transposer un son selon une mélodie donnée. Cette mélodie peut être générée par un algorithme, importée sous forme de fichier MIDI ou entrée directement avec les éditeurs d'*OpenMusic*. Pour des raisons didactiques, nous commencerons avec une gamme chromatique[90]. :

[89] Pour la description de toutes les fonctions, se référer au manuel d'utilisation [TUTSCHKU, 1998]. Pour la liste complète des fonctions de la librairie, se référer à l'annexe 2.

[90] Nous donnerons des exemples musicaux par la suite.

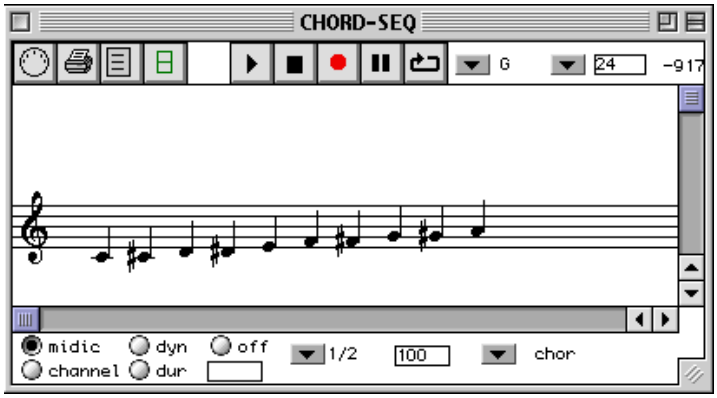
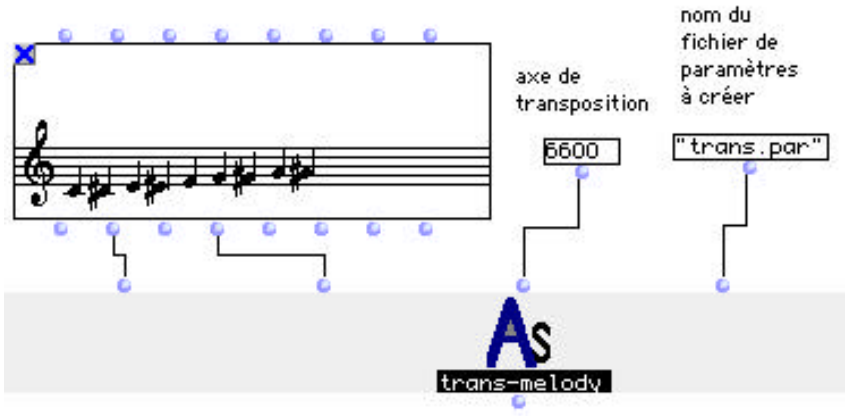


Fig. 3.9 Une mélodie éditée à l'aide d'un éditeur *ChordSeq* dans *OpenMusic*

Les hauteurs de la mélodie nous donnent les fréquences pour la transposition, tandis que le rythme de la mélodie correspondra au changement de ces fréquences dans le temps. Une fois que la mélodie et le fichier son ont été choisis, il faut spécifier l'axe de transposition. Une note de la mélodie en *MidiCents*[91] est définie comme point de référence dont la transposition sera zéro, ce qui correspond à la hauteur originale du fichier son. Toutes les notes au-dessus et en dessous de cet axe entraîneront une transposition selon l'intervalle par rapport à l'axe.



F
ig. 3.10 La fonction *trans-melody*, dont les valeurs de hauteurs et de rythme pour la transposition proviennent de *ChordSeq*.

[91] Dans la norme MIDI, le " do " de l'octave n° 3 correspond à la valeur 60, le " do#" à la valeur 61 etc... OpenMusic combine cette norme avec la notion des cents, (un démi-ton est divisé en 100 cents). En MidiCents, le " do " de l'octave n° 3 correspond à la valeur 6000, le " do# " à la valeur 6100. 6050 est alors un " do " plus un quart de ton.

temps	trans position
0.0	-600
0.499	-600
0.5	-500
0.999	-500
1.0	-400
1.499	-400
1.5	-300
1.999	-300
2.0	-200
2.499	-200
2.5	-100
2.999	-100
3.0	0
3.499	0
3.5	100
3.999	100
4.0	200
4.499	200
4.5	300
4.999	300

Regardons cet exemple à gauche : le fichier de paramètres pour une transposition dans *AudioSculpt* est formaté en deux colonnes. La première exprime le temps absolu du fichier son, la deuxième indique le facteur de transposition en *cents*. Les valeurs négatives entraîneront une transposition vers le bas, les valeurs positives, vers l'aigu.

L'axe de la transposition choisi dans notre gamme chromatique est 6600 = « fa# 3 ». La première note, étant un « do 3 », entraînera une transposition d'un triton vers le bas. Si nous observons le fichier des paramètres à gauche, généré par la fonction « trans-melody », nous voyons pour la durée du « do 3 » (0 ms à 499 ms) une transposition d'une valeur de -600[92]. Comme la gamme est chromatique, la transposition vers le bas diminue par intervalle de 100 jusqu'au moment où, trois secondes après le début, la mélodie comporte le « fa# 3 ». La valeur de transposition devient alors zéro (ce qui veut dire qu'il n'y a pas de transposition). Les notes suivantes entraînent une transposition vers l'aigu : le « sol 3 » un demi-ton, le « sol# 3 » un ton et le « la 3 » une tierce mineure.

Chaque valeur de transposition est répétée à la ligne suivante, car le programme *AudioSculpt* interpole[93] d'une façon linéaire des valeurs entre des lignes successives. En donnant les valeurs 0 et 300 comme paramètres de transposition sur deux lignes successives, nous obtenons un glissando entre la hauteur originale du son et sa transposition à une tierce mineure supérieure. Ces glissandi sont gênants par rapport au but de notre fonction, qui est de reproduire une mélodie. On les évite en maintenant la valeur jusqu'à la note suivante. *AudioSculpt* interpolera donc pendant la durée d'une note deux fois la même valeur, ce qui nous donne une valeur stable.

En rentrant une mélodie de n'importe quelle provenance, la fonction la traduit d'une

[92] Un triton est égal à 6 demi-tons, soit 600 cents.

[93] Une interpolation linéaire calcule les pas intermédiaires équidistants entre deux valeurs données. Pour une interpolation linéaire en 10 pas entre les valeurs 1 et 10 le résultat sera (1 2 3 4 5 6 7 8 9 10).

façon automatisée en paramètres pour la transposition. Si nous appliquons ces paramètres à un son, nous obtenons la superposition de cette mélodie avec l'évolution des hauteurs que le son comporte déjà. Le « fa# 3 » de notre exemple correspondra à la « non-transposition ». Lorsque le « fa# 3 » arrive dans notre mélodie, le son n'est donc pas transposé.

Nous voyons ici à gauche une mélodie jouée par une flûte[94] et à droite le même son après la transposition par la gamme chromatique[95].

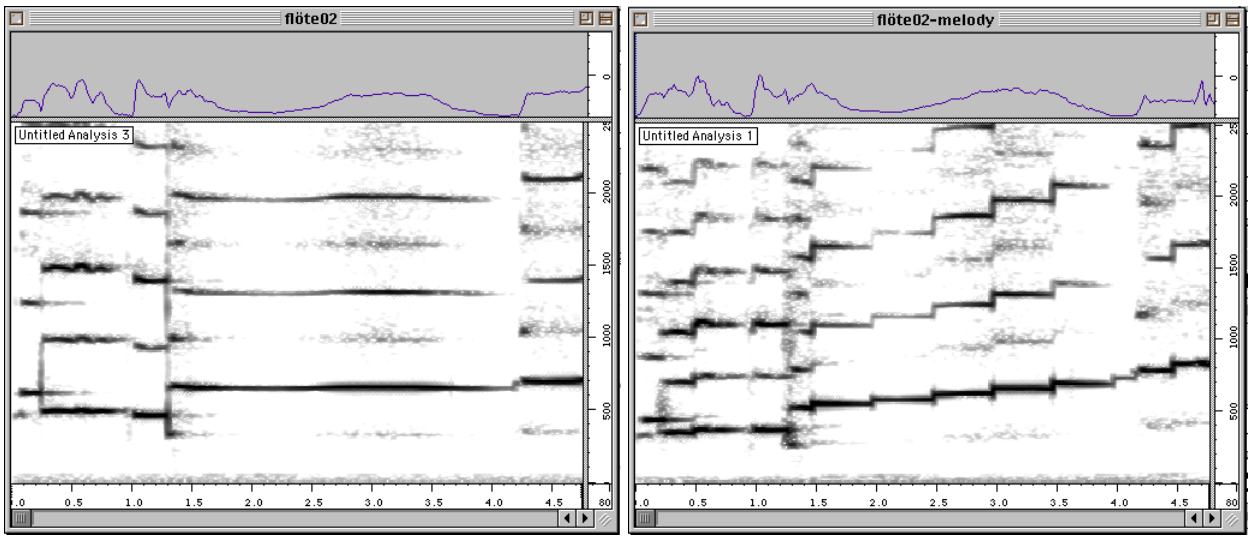


Fig. 3.11 Spectre d'une mélodie de flûte avant et après transposition par la gamme chromatique

Cette fonction a plusieurs avantages par rapport à l'édition de fichiers de paramètres dans un éditeur texte. Les chiffres très lourds et peu compréhensibles pour un musicien restent cachés, et il est possible par simple manipulation d'un paramètre (l'axe de transposition) d'obtenir d'autres versions de la transposition avec différents rapports intervalliques entre la hauteur originale du son et la mélodie.

Examinons maintenant l'emploi de cette idée pour créer un son stocké sur support qui accompagnera une mélodie jouée *live* par une flûte. La mélodie est à la fois utilisée pour l'écriture instrumentale et pour la transposition d'un son. Grâce à cette méthode, il est possible d'obtenir des

[94] Les exemples sonores se trouvent sur le CDRom qui accompagne ce travail. Voir annexe 1, exemple 10.
[95] Voir annexe 1, exemple 11.

rapports de hauteurs et de rythmes entre partie instrumentale et partie électronique.

Fig. 3.12 Mélodie pour la flûte et pour la transposition.

Nous partons de cette mélodie[96] en la considérant à la fois comme une partition pour la flûte et comme un paramètre de transposition pour un son de gong[97]. Les deux images suivantes montrent le spectre du gong avant et après la transposition.

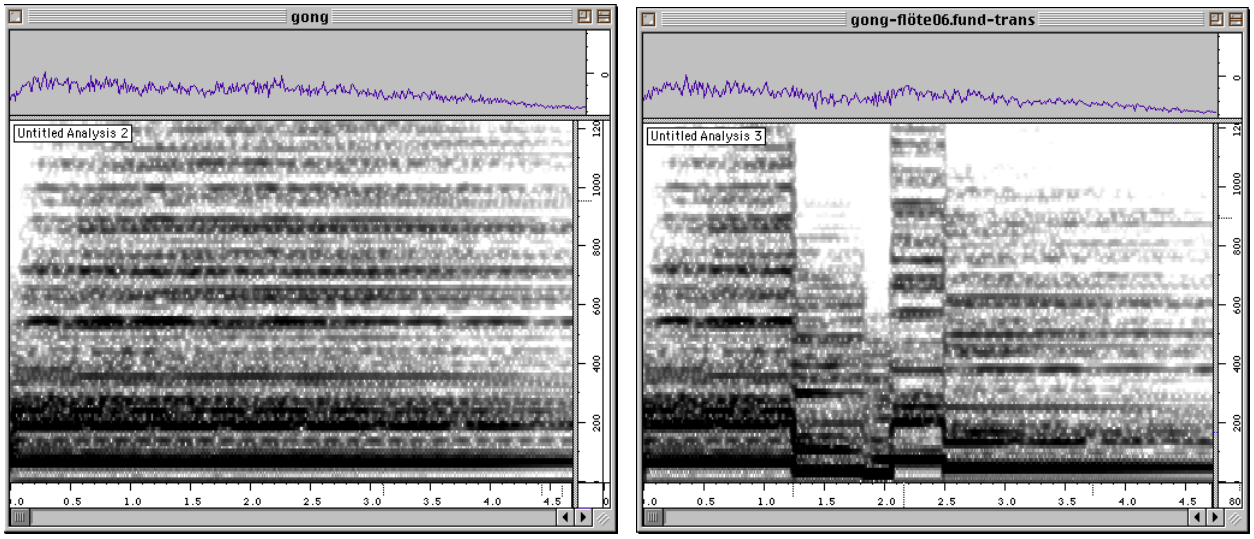


Fig. 3.13 Spectre du gong avant et après transposition.

La note de référence pour la « non-transposition » est le « do# 5 », donc la première note de la mélodie. Ainsi, le début du gong n'est pas transposé et il suivra l'évolution mélodique de la flûte à partir de la deuxième note. Dans cet exemple, l'évolution intervallique et rythmique de l'instrument est parallèle au son traité[98]. Mais il est tout à fait possible, à partir de ce processus, de

[96] Voir annexe 1, exemple 12.
[97] Voir annexe 1, exemple 13.
[98] Voir annexe 1. L'exemple 14 est le gong transposé; l'exemple 15 est la flûte jouée en même temps que le gong

développer une écriture à plusieurs voix pour instruments et sons électroacoustiques.

3.2.1.2 L'effacement de l'évolution mélodique d'un son

Le traitement de la transposition peut être également utilisé pour supprimer l'évolution des hauteurs dans un son. Dans le chapitre précédent, nous avons vu que la transposition par mélodie a pour résultat l'interaction entre les intervalles de la mélodie et les hauteurs déjà présentes dans le son. Si cette superposition des hauteurs n'est pas voulue, on peut d'abord appliquer la fonction *fund-trans* au son original afin de supprimer les changements de hauteurs.

L'analyse fondamentale du son de la flûte nous donne la mélodie à gauche. En appliquant l'inverse comme mélodie de transposition sur le son lui-même, nous allons supprimer l'évolution des hauteurs et obtenir le rythme, joué sur une note ténue[99].

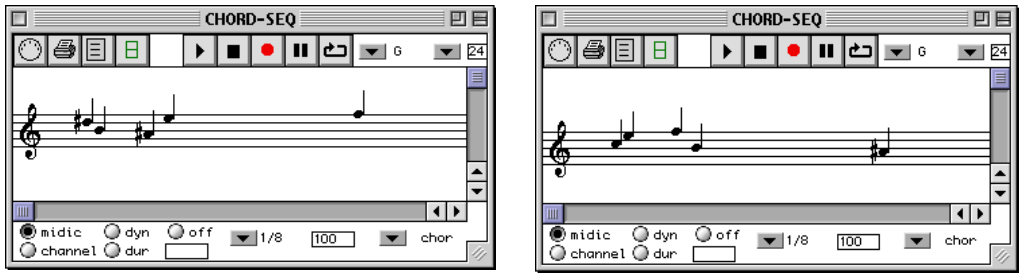


Fig. 3.14 L'évolution de la fondamentale (à gauche) et son inversion (à droite).

Le timbre du son après la transposition sera néanmoins différent d'un enregistrement d'une note de flûte répétée : chaque transposition affecte le spectre, car les formants de la flûte sont également transposés..

---

transposé.

[99] Ce processus fonctionne le mieux pour les sons monodiques avec une fréquence fondamentale bien définie; car un son polyphonique ne comportera pas uniquement une ligne mélodique.

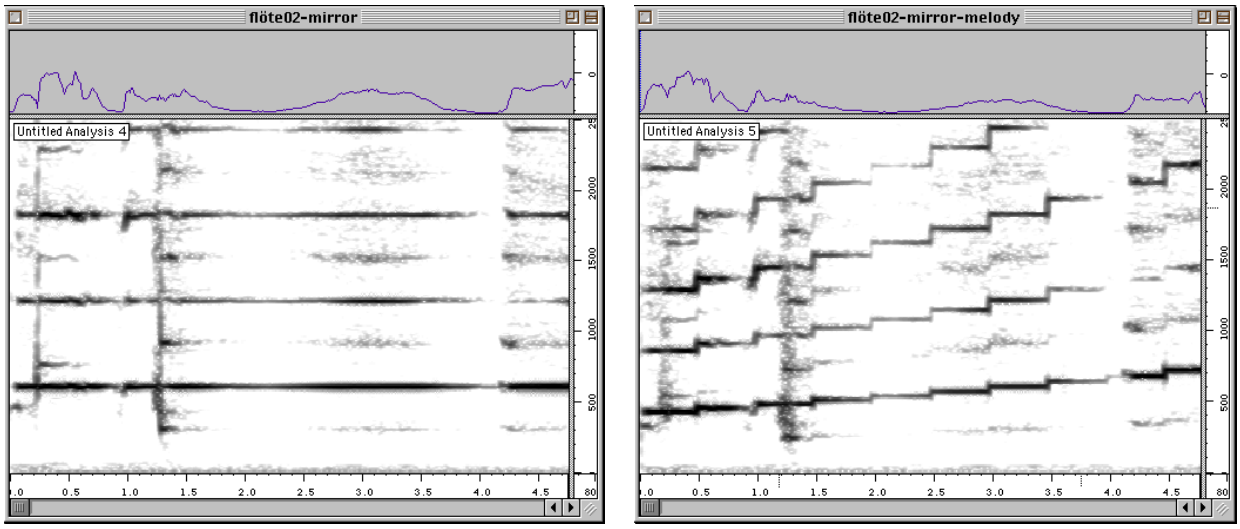


Fig. 3.15 A gauche, son de flûte dont l'évolution des hauteurs a été enlevée, à droite, le même son transposé par la gamme chromatique

Le sonagramme à gauche montre le spectre du son de flûte après avoir supprimé la mélodie[100] et celui de droite est le résultat de l'application de la gamme chromatique à ce même spectre[101]. Nous voyons alors que la gamme est parfaitement reproduite et que les deux mélodies ne sont plus superposées.

Pouvoir ainsi détacher un son de sa progression de hauteurs est un concept très intéressant. A notre connaissance, il n'existe aucun autre outil permettant de réaliser cette idée. On ne garde ainsi que le rythme avec les changements de timbre et on peut en suite appliquer une autre mélodie sur ce son.

3.2.1.3 La génération du vibrato

Un autre paramètre très important dans l'écriture instrumentale et vocale au XXe siècle est le contrôle du vibrato. Les compositeurs définissent avec grande précision sur

[100] Voir annexe 1, exemple 16.
[101] Voir annexe 1, exemple 17.

quelle note, avec quelle intensité et durée un instrumentiste ou un chanteur doit rendre un vibrato. Dans *Etudes Transcendentales* pour flûte, hautbois, soprano, clavecin et violoncelle de Brian Ferneyhough par exemple, l'échelle du vibrato va de « non vibrato » à « vibrato exagéré, rapide et irrégulier »[102].

Le vibrato est une variation irrégulière en fréquence et en amplitude de la hauteur de la note jouée. Dans les programmes de synthèse sonore comme *Chant* et *Csound*, il existe des fonctions *jitter* permettant de doter d'un vibrato l'évolution des partiels ou des formants. Un son électronique comportant un vibrato devient plus « naturel ». Ce paramètre compositionnel ainsi contrôlable dans l'écriture instrumentale ou vocale et dans la synthèse peut être appliqué grâce à cette bibliothèque à n'importe quel son.

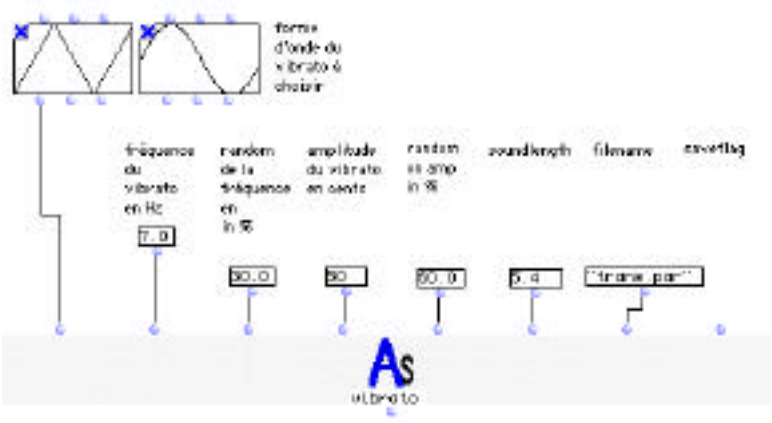


Fig. 3.16 La fonction *vibrato* de la bibliothèque « OM-AS ».

Les paramètres à choisir sont la forme d'onde du vibrato, sa fréquence, le taux de déviation autour de cette fréquence, et l'amplitude avec également un taux de déviation. La notion de hasard est importante lorsque l'on joue sur la fréquence et l'amplitude, pour éviter une modulation trop rigide et donc non naturelle. Pour visualiser cet effet, nous allons prendre un son

[102] Brian Ferneyhough, *Etudes Transcendentales*, for flute, oboe, soprano, harpsichord and violoncello, Edition Peters, London, Frankfurt, New York

sinusoïdal de 500 Hertz[103].

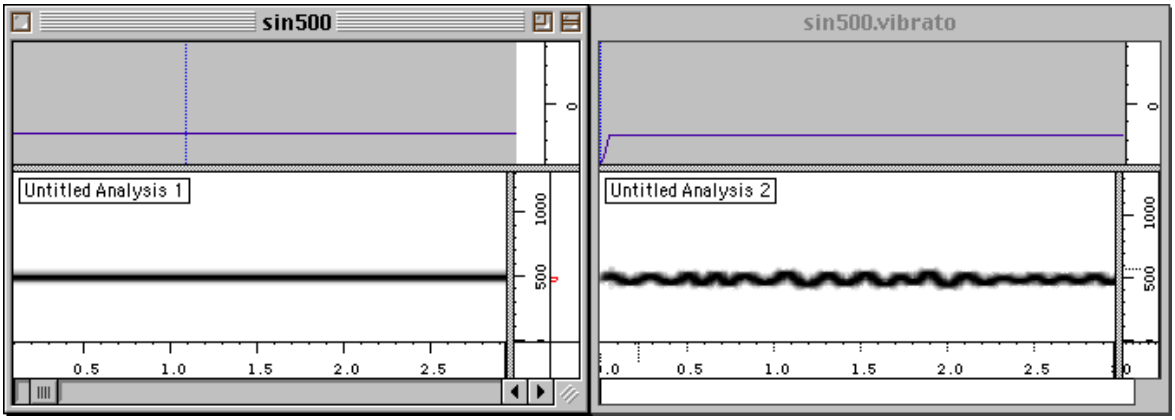


Fig. 3.17 Son sinusoïdal sans et avec vibrato

On voit clairement que le vibrato n'est pas régulier, mais varie en fréquence et en amplitude. Appliquons maintenant ce même processus sur un échantillon vocal, qui contient peu de vibrato à l'origine.

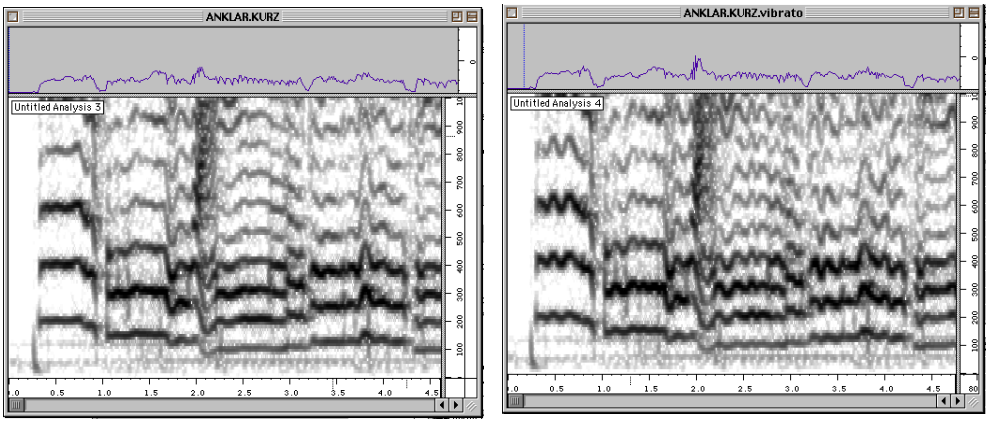


Fig. 3.18 Chant irlandais avant et après l'application du vibrato

Les deux sonagrammes montrent un extrait d'une mélodie traditionnelle d'Irlande avant et après l'application du vibrato[104].

[103] Voir annexe 1. L'exemple 18 est le son sinusoïdal original, l'exemple 19 est ce même son affecté d'un vibrato.
[104] Voir annexe 1. L'exemple 20 est le chant irlandais original; l'exemple 21 est le chant irlandais avec vibrato.

Nous voyons alors qu'appliquer comme paramètre de transposition une onde ayant une fréquence irrégulière autour de 7 Hertz et une évolution d'ambitus également irrégulière à l'intérieur d'un demi-ton permet de simuler l'effet naturel du vibrato sur un son donné. Grâce à cette méthode, le contrôle précis du vibrato recherché par beaucoup de compositeurs dans l'écriture instrumentale et vocale devient possible également pour le traitement sonore. En effet, tous les paramètres (fréquence, amplitude, degré de hasard, etc.) peuvent être contrôlés d'une façon précise. L'écriture peut donc varier, comme chez B. Ferneyhough, de « non-vibrato » à « vibrato exagéré ».

3.2.2 Le lien entre la formalisation des hauteurs et le traitement du specte par filtrage

Depuis que des sons sont manipulés, le filtrage est un des traitements les plus répandus. Nous allons voir dans ce chapitre comment l'évolution dans le temps des paramètres de différents types de filtres peut être contrôlée par l'écriture ou par une analyse préalable d'un son dont sont extraits quelques paramètres pertinents.

3.2.2.1 L'application d'une mélodie au filtre

Comme dans la sous-partie 3.2.1.1, nous allons utiliser une mélodie pour faire varier les paramètres du traitement. Cette fois-ci, nous allons étudier le contrôle de l'évolution d'un filtre. Nous utiliserons pour ce faire le *band filter* d'*AudioSculpt*[105]. La variation des fréquences est de nouveau décrite par un fichier de paramètres. Le format de ces données, peu intuitif, amène malheureusement beaucoup de musiciens a se tenir à distance d'un contrôle aussi complexe. Pour une seconde de filtrage avec dix bandes de fréquences, voici l'exemple d'un fichier de paramètres difficile à lire et à rédiger.

```
0.045 20 1 170 180 340 360 510 540 680 721 850 901 1020 1081 1190 1260 1360 1441 1530 1621 1700 1801
0.136 20 1 169 179 338 358 507 537 676 716 845 895 1014 1075 1183 1253 1352 1433 1522 1612 1690 1791
0.227 20 1 165 175 330 350 496 525 661 700 826 875 991 1050 1156 1225 1322 1400 1487 1575 1652 1750
1816
```

[105] Pour l'explication de ce type de filtre, se referer au chapitre 3.1.4.2.

0.317 20 1 163 173 327 346 490 519 653 692 816 865 980 1038 1143 1210 1306 1384 1470 1557 1633 1730 1795
0.408 20 1 168 178 336 356 504 534 672 712 840 890 1009 1068 1176 1246 1345 1425 1513 1603 1681 1780
0.499 20 1 168 178 336 356 504 534 672 712 840 890 1009 1068 1176 1246 1345 1425 1513 1603 1681 1780
0.59 20 1 174 184 348 368 521 552 695 737 870 922 1043 1105 1217 1290 1390 1473 1564 1657 1740 1843 1913
0.68 20 1 175 185 350 370 524 556 699 741 874 926 1049 1111 1225 1297 1399 1482 1573 1667 1748 1852 1924
0.771 20 1 179 189 357 379 536 568 715 757 893 946 1072 1136 1252 1326 1430 1515 1608 1704 1787 1893
0.862 20 1 185 196 369 391 554 587 738 782 923 978 1107 1173 1293 1370 1477 1564 1661 1760 1845 1955
0.952 20 1 197 209 394 418 591 627 789 835 987 1045 1183 1253 1381 1463 1577 1671 1774 1880 1973 2091

En utilisant la fonction *bandfilt-melody,* nous évitons d'avoir à nous occuper de ces chiffres. Reproduisons la mélodie dans un éditeur *ChordSeq*. La fonction traduira les hauteurs de la mélodie en paramètres pour le filtre. La mélodie utilisée dans cet exemple est la suivante. Elle servira pour le filtrage du son d'un gong :

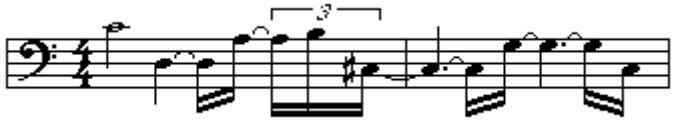



Fig. 3.19 Mélodie servant pour le filtrage du son de gong

La mélodie sera transformée en une bande de fréquence qu'on peut soit garder dans le spectre du son, soit enlever. Une fois que la mélodie a été entrée, calculée ou importée par un fichier MIDI, il faut spécifier la largeur de cette bande en Hertz. L'inconvénient de cette approche est de ne prendre qu'une bande de fréquence dans un son, dont le timbre par conséquent se perd - le spectre du son résultant de ce processus est trop réduit. Même si la bande est assez large (100 Hertz dans notre exemple), nous n'obtenons qu'une bande de « bruit coloré »[106] et ne gardons pas le timbre du gong.

[106] Voire annexe 1, exemple 22.

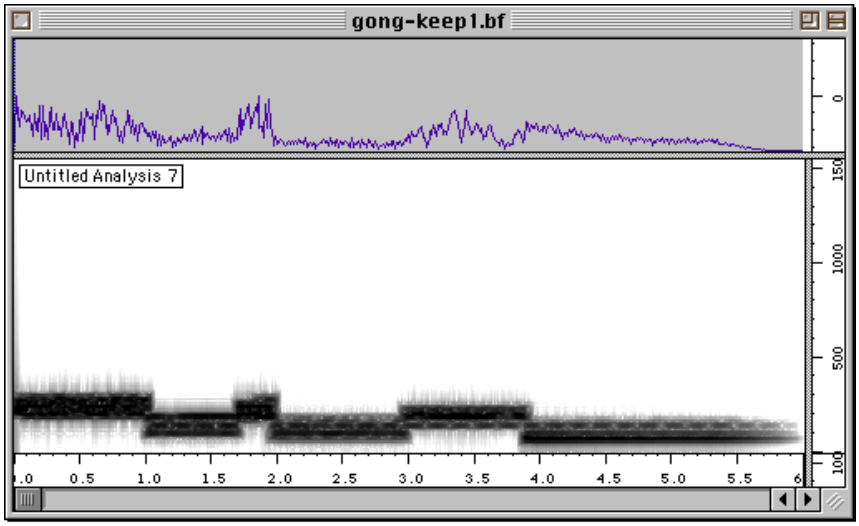


Fig. 3.20 Son du gong filtré par un *band filter* gardant une bande de fréquences qui correspond à l'évolution des notes de la mélodie.

Pour pouvoir appliquer la mélodie en gardant néanmoins un plus grand nombre de fréquences du son original, nous introduisons ici la notion de bandes harmoniques au-dessus de la fréquence donnée par la mélodie. Si la note de la mélodie a une fréquence de 110 Hertz et si nous spécifions que nous voulons utiliser les bandes harmoniques 1 3 4 6, le résultat sera un filtre avec quatre bandes aux fréquences 110, 330, 440 et 660 Hertz, chacune ayant une largeur de bande spécifiée. Prenons par exemple une largeur de bande de 20 Hertz, nous obtenons les fréquences suivantes :

* première bande : de 100 à 120 Hertz
* deuxième bande : de 320 à 350 Hertz
* troisième bande : de 430 à 450 Hertz
* quatrième bande : de 650 à 670 Hertz.

Il est alors nécessaire de spécifier quelles bandes doivent être gardées ou enlevées de façon cohérente avec le son à traiter. Étudions l'emploi de cette méthode sur le son du gong. Les facteurs 1 2 4 5 7 et 8 ont été définis pour les bandes de fréquences.

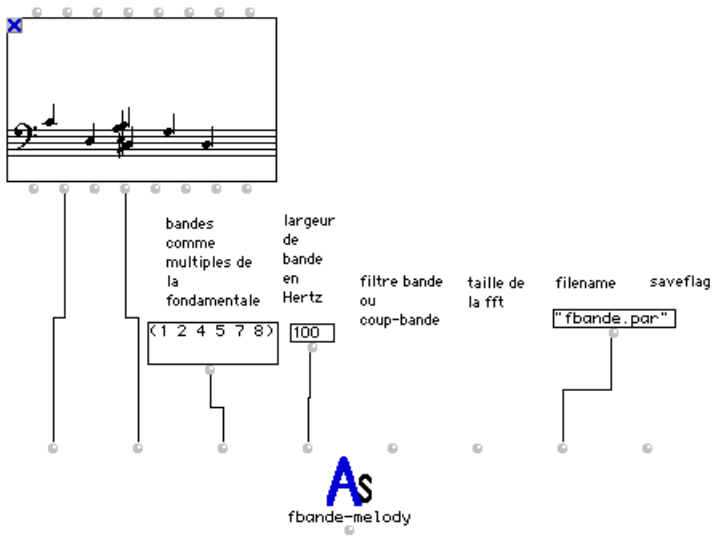


Fig. 3.21 La fonction *fbande-melody*

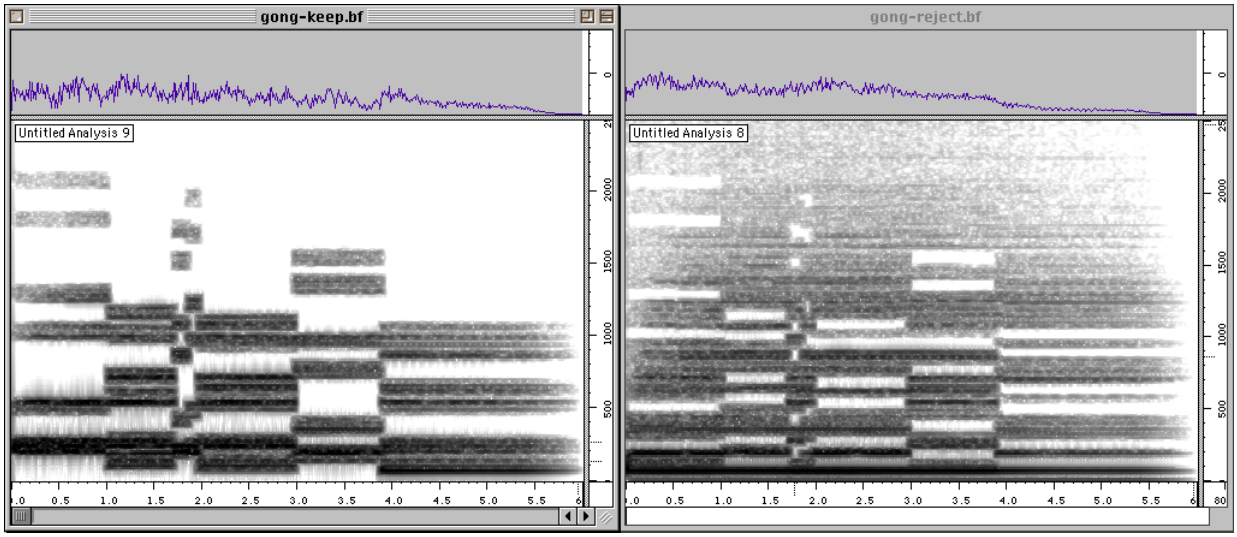


Fig. 3.22 A gauche, spectre du gong après filtrage gardant l'énergie; à droite, filtrage effaçant l'énergie

Le sonagramme de gauche est le résultat d'un filtrage conservant les bandes de fréquences[107], celui de la droite montre le son filtré, sans ces bandes[108]. Nous voyons que l'évolution de la bande la plus basse reste la même que dans la figure 3.20. Au-dessus de cette

[107] Voir annexe 1, exemple 23.
[108] Voir annexe 1, exemple 24.

bande, qui correspond à des fréquences de notre mélodie, se trouvent des bandes de fréquences multiples des facteurs 2, 4, 5, 7, et 8.

Pour que cette méthode donne des résultats convaincants, il est nécessaire que les régions de fréquences spécifiées par la mélodie d'une part, ses bandes harmoniques d'autre part, et enfin le contenu spectral du son à filtrer, soient cohérents. On tenterait sinon de garder ou d'enlever des fréquences qui n'existent pas dans le son. Nous sommes donc de nouveau face à un cas dans lequel l'application de paramètres compositionnels ne peut pas se faire a priori, et ne fait sens que si l'on connaît le spectre du son à traiter.

Avec le *band filter* il n'est pas possible de contrôler la dynamique des régions spectrales à garder ou à couper. Nous verrons plus tard qu'un contrôle de l'amplitude devient possible avec les *breakpoint filter*. Cette méthode applique alors au spectre d'un son une évolution des hauteurs. Selon la largeur de la bande, le résultat garde plus ou moins les qualités spectrales du son de départ. Comme nous le verrons dans le chapitre 3.3, la compositrice Ketty Nez utilise ce paramètre pour contrôler l'intégration des sons naturels dans une pièce pour cor et bande. Ces sons naturels suivent par filtrage une succession d'accords en gardant plus ou moins selon la largeur de la bande leurs caractéristiques propres.

3.2.2.2 Le contrôle du filtre par l'évolution de la fréquence fondamentale

Nous allons maintenant étudier la possibilité de contrôler l'évolution du *band filter* par des paramètres issus d'une analyse de fondamentale. Ces sortes d'analyses sont souvent utilisées par certains compositeurs pour connaître la progression des hauteurs d'un son et pour les transcrire en notation traditionnelle. Nous sommes tout particulièrement intéressés par deux points dans l'utilisation de cette méthode :

Tout d'abord, il devient possible de contrôler un filtre avec ces bandes de fréquences bien définies, dont l'évolution dans le temps suit la fréquence fondamentale d'un son, pour filtrer un autre son. Cette approche est néanmoins très différente du filtrage par convolution, où l'évolution spectrale d'un son est directement appliquée à l'autre son. La méthode proposée permet d'appliquer des algorithmes de formalisation et de composition aux paramètres issus de l'analyse, puis au son.

Il est ensuite possible d'appliquer une évolution du filtre au son même qui a servi pour l'analyse de la fondamentale. À l'aide de cette méthode, il est possible de n'effacer ou de ne garder que des partiels choisis d'un son.

Examinons tout d'abord le premier point et analysons l'évolution de la fréquence fondamentale d'un court extrait pour trompette de Miles Davis.[109].

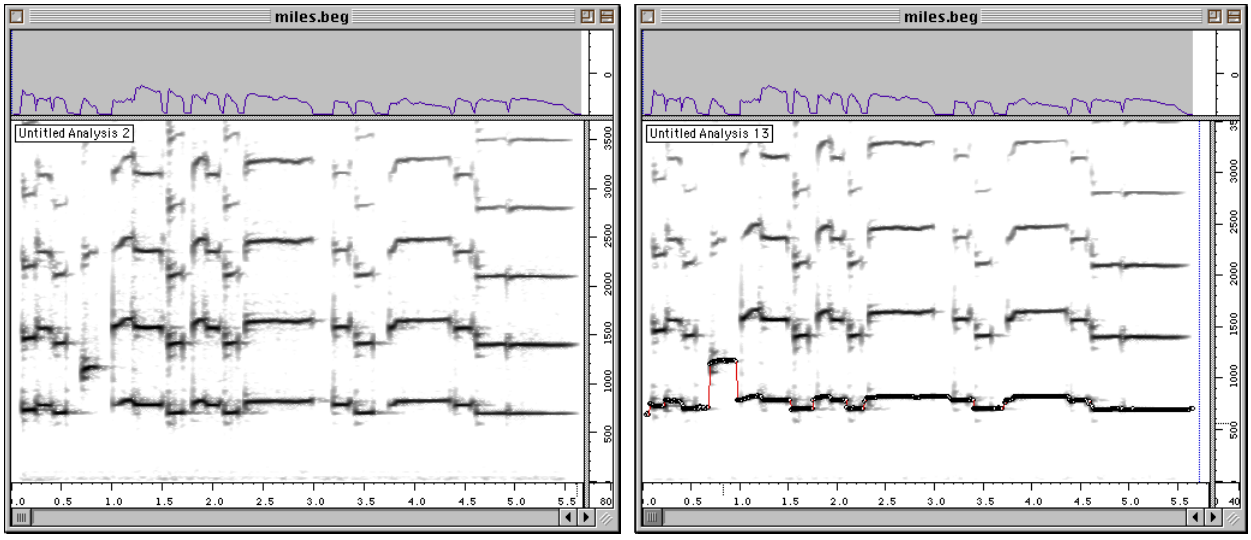


Fig. 3.23 A gauche, spectre du son de trompette et à droite, analyse de la fondamentale

Le sonagramme à gauche montre le spectre du son avec ses partiels. L'analyse de la fondamentale à droite, visualisée dans le sonagramme par le trait noir, retrace parfaitement

[109] Voir annexe 1, exemple 25.

l'évolution de la fréquence du premier partiel. Nous allons utiliser ces données pour décrire l'évolution du *band filter*. Au lieu d'avoir à fournir une mélodie écrite, comme c'était le cas dans la sous-partie précédente, c'est l'analyse qui nous donne maintenant les hauteurs pour contrôler le filtre.

Nous avons choisi de traiter un bruit d'applaudissement, car il a un spectre riche. La raison de ce choix est à chercher dans les caractéristiques connues du spectre de la trompette. La fréquence fondamentale varie entre 702 et 1147 Hertz. Ce sont ces valeurs qui vont être traduites en fréquences pour la première bande du filtre. La deuxième bande harmonique du filtre variera donc entre 1404 et 2294 Hertz, la troisième entre 2106 et 3441 Hertz — ainsi de suite. Si nous voulons garder ces bandes de fréquences dans le son à filtrer, nous devons partir d'un son renfermant une grande énergie sonore dans cette zone. Voici les deux sonagrammes d'applaudissement, avant et après le filtrage. Le son a gardé son grain d'applaudissement et l'évolution globale de son spectre, tout en suivant une progression mélodique[110].

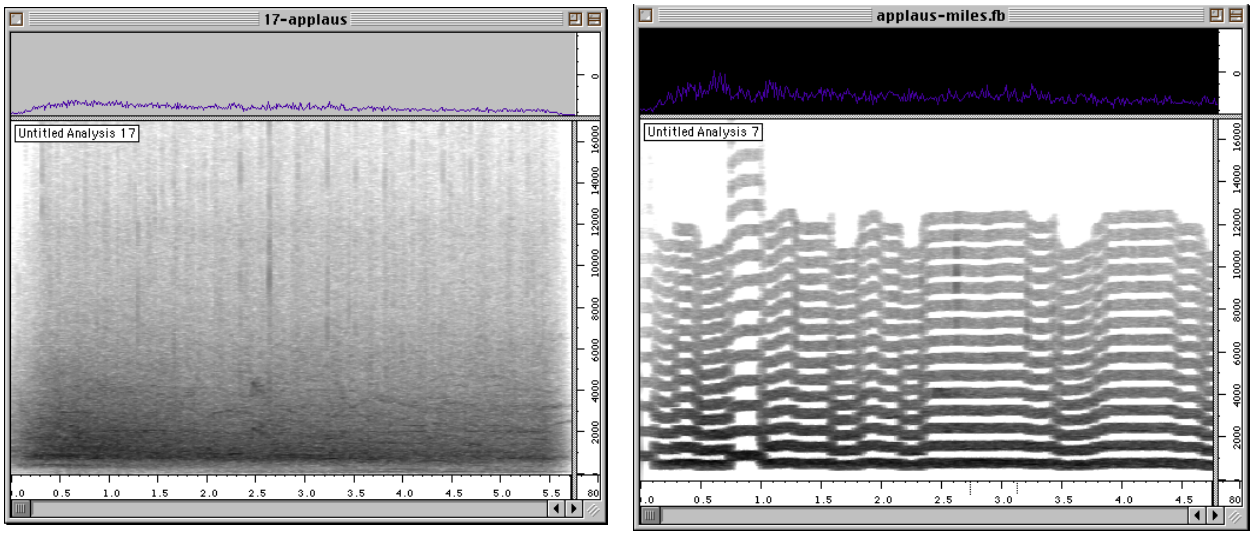


Fig. 3.24 Spectre du son d'applaudissement, avant et après le filtrage

[110] Voir annexe 1. L'exemple 26 est le son d'applaudissement; l'exemple 27 est le même son filtré.

Il est de nouveau possible d'appliquer ce processus à la musique mixte. L'analyse de la fondamentale d'un son peut servir pour la création du matériau de l'écriture instrumentale tout en étant utilisée pour le filtrage d'un son.

Nous allons voir que le deuxième intérêt de la chaîne « analyse fondamentale — formalisation et reformatage des donnés — écriture du fichier de paramètres pour le *band filter* — traitement » tient dans la possibilité d'une application sur le son lui-même. Grâce à cette méthode, nous pouvons sculpter le spectre d'un son en gardant ou en rejetant un certain nombre de partiels. Nous reprenons le même son de la trompette et ne retenons durant le filtrage que les bandes harmoniques paires. La première note, étant un « fa# 4 », a une fréquence de 740 Hertz. Si nous ne gardons que les bandes harmoniques paires au-dessus de la fréquence fondamentale, nous effaçons alors les partiels impairs. Le résultat sonore est une transposition d'une octave : le deuxième partiel (1480 Hertz) est maintenant la fréquence la plus basse, suivi du quatrième partiel (2960 Hertz), etc. Pour notre oreille, un nouveau spectre harmonique est reconstitué, basé sur la fréquence de 1480 Hertz, d'une octave plus aiguë que le son original.

Il est très intéressant de noter qu'avec cette transposition par filtrage, les formants de l'instrument ne sont pas transposés. Nous avons uniquement enlevé les composants spectraux, qui correspondent aux multiples impairs de la fréquence fondamentale.

Si nous ne gardons que les partiels pairs, un autre effet très intéressent se produit : le timbre de la trompette se rapproche du timbre d'une clarinette. Une caractéristique du spectre de la clarinette tient justement dans le fait que les partiels impairs dans le registre médium de l'instrument ont une amplitude plus grande que les partiels pairs[111].

[111] Voir annexe 1. L'exemple 25 est le son original; l'exemple 28 ne garde que les partiels pairs; l'exemple 29 ne garde que les partiels impairs.

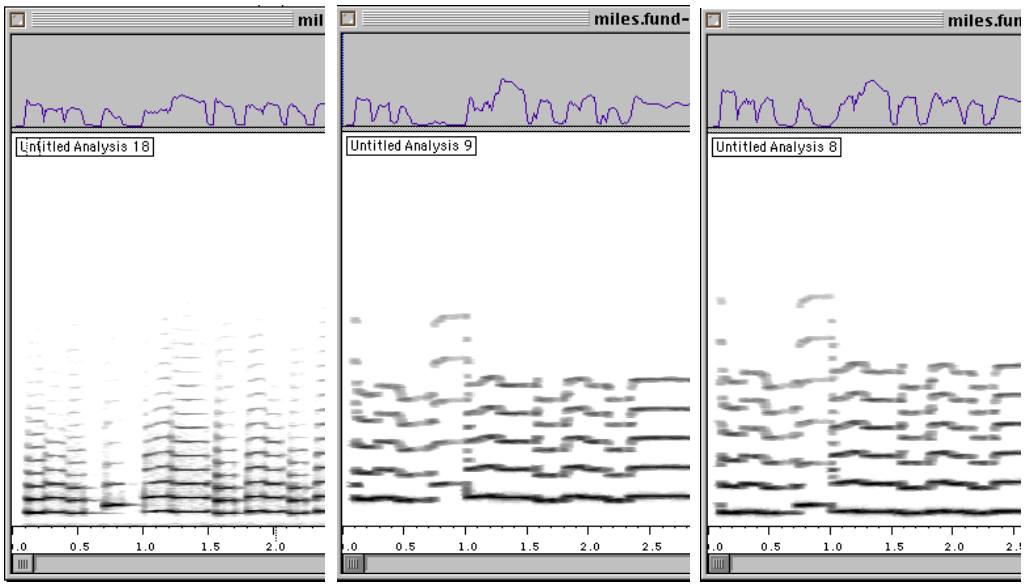


Fig. 3.25 À gauche, le spectre original de la trompette; au centre, le spectre ne gardant que les partiels pairs; à droite, le spectre ne gardant que les partiels impairs.

L'application de paramètres compositionnels au traitement sonore n'est donc pas uniquement synonyme d'un processus de création de paramètres par écriture formalisé, avant toute application de ces paramètres au son, mais offre également la possibilité de partir de données acoustiques. Les méthodes décrites ici rendent les données issues de l'analyse fondamentale accessible à la reformulation, à la recomposition et à l'intégration dans le processus compositionnel. Connaître les règles acoustiques rend possibles des traitements complexes, liés à l'écriture.

Les compositeurs de musique électronique cherchaient à composer des spectres en additionant un certain nombre de partiels contrôlés. Il est aujourd'hui possible de traiter (donc de composer) les partiels des sons existants selon des idées formalisées.

3.2.2.3 Le contrôle du filtre par une séquence rythmique

Ce chapitre, toujours dédié au filtrage, va nous permettre maintenant d'étudier comment un filtre peut être commandé par un rythme. Cette méthode nous servira à créer un lien entre une mélodie jouée *live* et un fichier son.

Le but de cette démarche est d'ouvrir le filtre à chaque note d'un rythme choisi, avant de le refermer progressivement pendant la durée de la note. Plus précisément : nous allons spécifier deux fréquences dans le spectre correspondant respectivement à l'état ouvert et à l'état fermé. Chaque note du rythme entraînera une ouverture immédiate du filtre pour atteindre la fréquence de fermeture au cours de la durée de la note. Avant de réaliser l'exemple de la mélodie pour marimbaphone, nous allons décrire le fonctionnement avec un rythme simple, filtrant un bruit blanc.

Nous allons utiliser pour ce traitement le *breakpoint filter*, car il nous permet de contrôler les amplitudes. Le rythme suivant va contrôler l'ouverture et la fermeture du filtre. Le sonagramme à droite montre clairement le résultat de cette méthode appliquée a un bruit blanc[112].

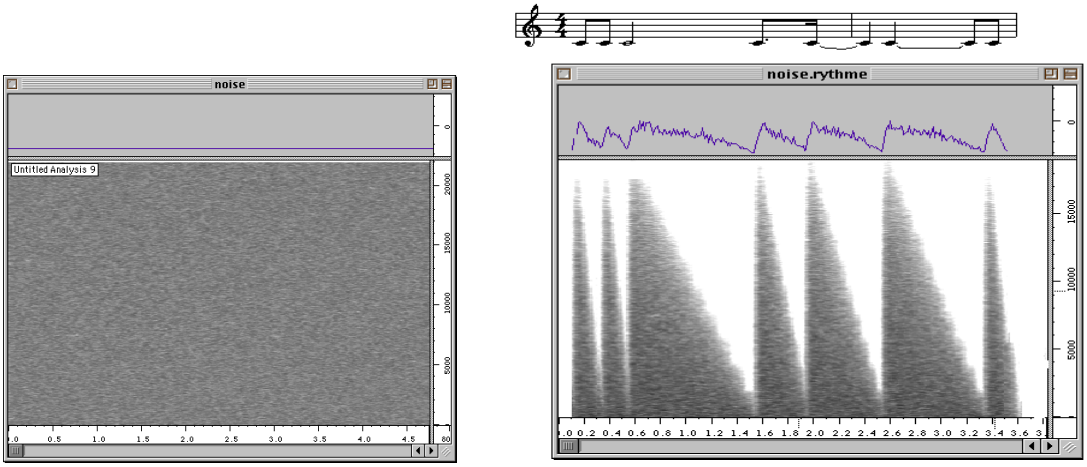


Fig. 3.26 Spectre du bruit blanc, avant et après le filtrage

Cette méthode de filtrage simule le comportement acoustique de beaucoup d'instruments. Le filtre s'ouvre rapidement à chaque impulsion de notre rythme et tous les partiels du son filtré apparaissent soudainement — ce qui correspond à l'effet naturel d'une attaque. Pendant la durée d'une valeur rythmique le filtre se ferme, en commençant par les fréquences aiguës (les partiels aigus vont disparaître en premier.) Cet effet a son équivalent au niveau

[112] Voir annexe 1, exemple 30

instrumental : après une attaque, les partiels aigus perdent plus rapidement leur énergie que les partiels graves.

Après avoir vu comment un filtre peut être contrôlé grâce à un rythme, tentons maintenant d'établir un lien entre l'écriture instrumentale et cette forme de traitement sonore. Le rythme que nous allons utiliser pour contrôler le filtre est issu d'une analyse faite avec *AudioSculpt*. Une fois le spectre calculé, nous utilisons la fonction *place-markers*. Comme nous l'avons décrit dans la sous-partie 3.1.3.2, cette fonction identifie les changements brutaux d'énergie dans le spectre et place des marqueurs à ces endroits. Nous utiliserons une courte séquence pour marimbaphone[113]. Ce court extrait contenant des notes simples et quelques trémolos a été choisi afin de pouvoir décrire une difficulté qui surgit lorsque l'on utilise des analyses rythmiques pour contrôler le filtre. Ces notes rapides vont faire apparaître beaucoup de marqueurs en un temps assez court.

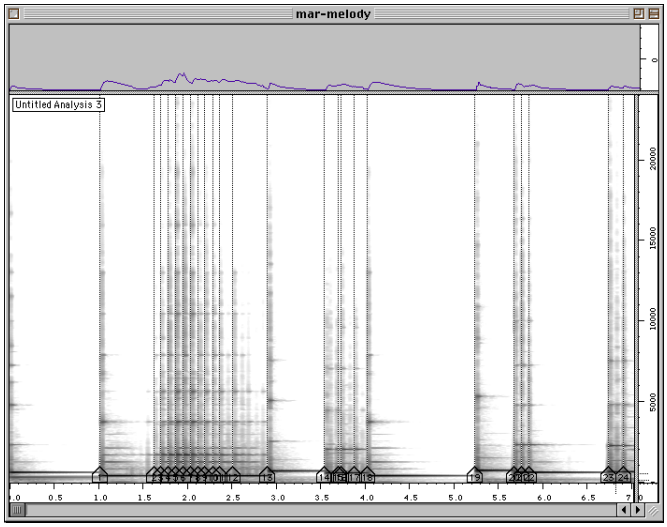


Fig. 3.27 Résultat de l'analyse des marqueurs

Il faut bien déterminer dans quel but les données analysées seront utilisées. S'il s'agit de transcrire le rythme en notation instrumentale, une très grande précision est requise. Néanmoins, le compositeur va quantifier le résultat selon ses besoins pour trouver un compromis entre exactitude

[113] Voir annexe 1, exemple 31

par rapport au rythme original et lisibilité de la notation symbolique. Notre but — contrôler l'évolution d'un filtre dans le temps — demande une autre réflexion. Comme dans le cas de la notation instrumentale, la transcription du rythme ne peut se faire « automatiquement », sans connaissance pointue du traitement. Comme nous l'avons expliqué, le filtre s'ouvre à chaque impulsion de notre rythme et se referme pendant la durée de la note. Pour que l'effet de ce filtrage soit perceptible, une certaine durée est donc nécessaire. Il n'y a pas de limites imposées à l'avance, ces valeurs dépendent également du spectre du son à filtrer, mais il faut tenir compte du fait que dans certains cas, la position des marqueurs doit être modifiée pour résoudre ce problème (il est même parfois nécessaire de supprimer certains marqueurs). Voici l'analyse après avoir effacé les marqueurs du trémolo. En fait nous n'avons gardé que les marqueurs sur le début de chaque note — le trémolo est alors considéré comme une note tenue.

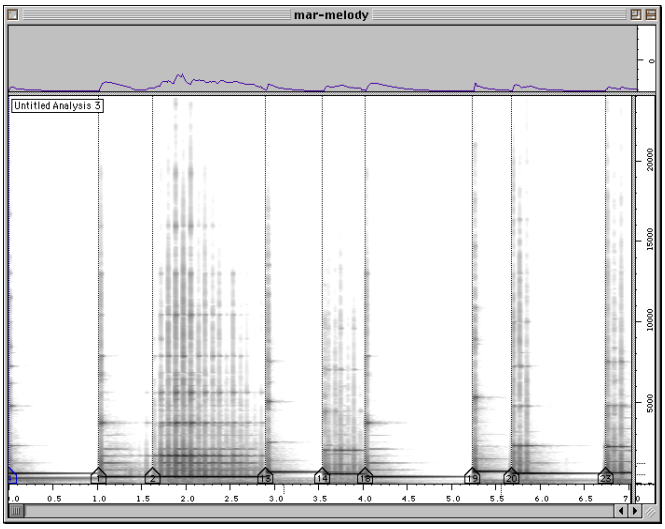


Fig. 3.28 Marqueurs sur le début de chaque note

Le rythme analysé et codifié en temps absolu par les marqueurs est ensuite traduit en valeurs pour le *breakpoint filter* comme dans le chapitre précédent. Nous avons choisi de filtrer un son d'une séquence de flûtes à cinq voix. L'enregistrement à été dilaté avec un facteur 20. Le son a un spectre riche et contient sa propre évolution mélodique.

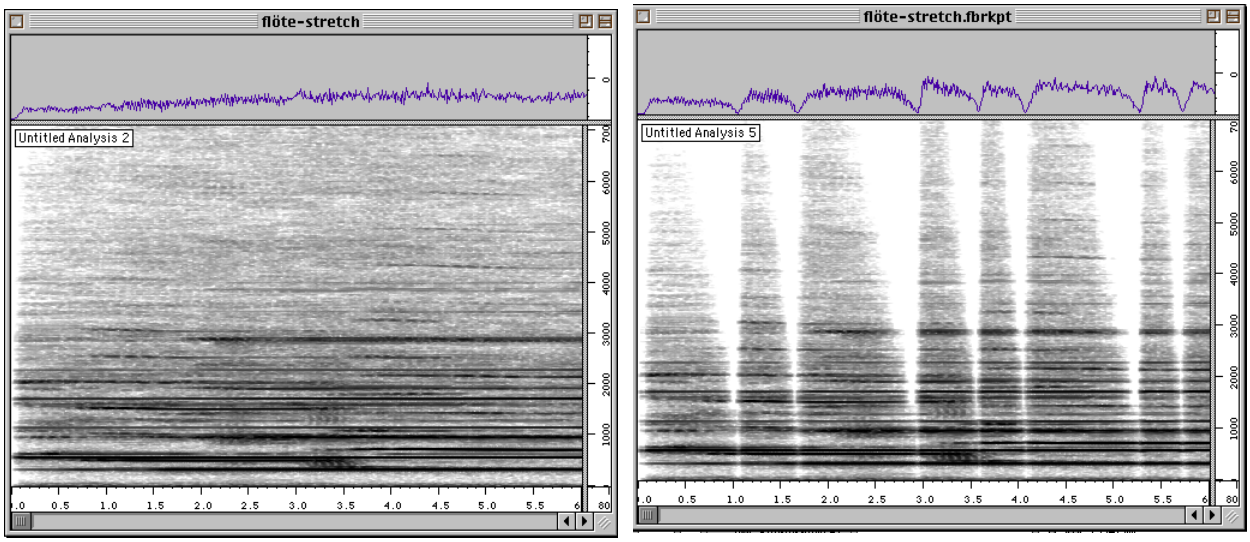


Fig. 3.29 Spectre de la séquence de flûte avant et après le filtrage

Ces deux sonagrammes montrent un son de flûte dilaté avant et après le filtrage par le rythme de la séquence du marimbaphone[114]. Si nous écoutons l'exemple numéro 34[115], un lien étroit entre le rythme du marimbaphone et du fichier son apparaît. Néanmoins, les hauteurs du fichier son n'ont aucun rapport avec la mélodie de l'instrument. Pour établir ce lien et pour obtenir ensuite une plus grande cohérence entre instrument et électronique, nous allons maintenant combiner ce traitement avec une transposition suivant l'évolution de la fréquence fondamentale, selon le processus décrit dans la sous-partie 3.2.2.1.

La fréquence fondamentale de la mélodie du marimbaphone sert à transposer la séquence de flûte, déjà filtrée (exemple n° 33). Voici l'analyse fondamentale de la mélodie du marimbaphone et le son n° 33 transposé.

[114] Voir annexe 1. L'exemple 32 est le son dilaté de la séquence de flûtes, l'exemple 33 est le résultat du filtrage.
[115] Voir annexe 1, exemple 34

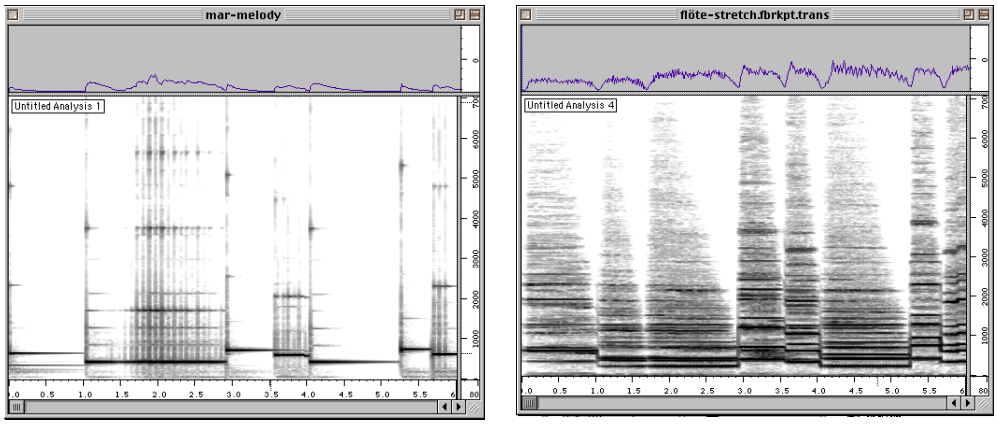


Fig. 3.30 A gauche, analyse fondamentale de la mélodie du marimbaphone; à droite, transposition du son déjà filtré

Le résultat est alors une séquence d'événements sonores. Un événement correspond à la durée d'une note dans la séquence du marimbaphone. Chaque événement contient un spectre complexe résultant des hauteurs de flûte superposées. L'évolution de la fréquence sur laquelle ces spectres se basent suit les intervalles de la mélodie du marimbaphone. De plus, l'enveloppe spectrale de chaque événement a été sculptée pour obtenir des attaques et une disparition des partiels de l'aigu vers le bas. En jouant à nouveau cette séquence avec la mélodie du marimbaphone, nous constatons une grande fusion des deux domaines, instrumental et électroacoustique. Cette fusion est particulièrement prononcée car les séquences de flûte se basent sur les mêmes hauteurs et intervalles que celles de marimbaphone[116].

Une application plus complexe est envisageable pour réaliser une écriture polyphonique et polyrythmique entre instrument et bande ou entre différentes voix de la partie électroacoustique.

[116] Voir annexe 1. L'exemple 35 est la séquence de flûte filtrée et transposée; l'exemple 36 est l'enregistrement de la séquence du marimbaphone avec le son de l'exemple 35.

3.2.2.4 L'utilisation de l'analyse des partiels pour contrôler un filtre

Dans cette sous-partie, nous allons employer une autre analyse réalisable avec *AudioSculpt* pour obtenir des paramètres qui guideront l'évolution d'un filtre. C'est l'analyse des partiels. Comme expliqué dans la sous-partie 3.1.3.3, cette analyse retrace l'énergie dans le sonagramme pour en retirer les fréquences les plus fortes. Ce processus à été employé à l'IRCAM par exemple en 1995 dans la pièce *Empreintes,* pour 14 instruments et dispositif électronique[117] de Joshua Fineberg. Il analyse l'évolution des partiels d'un extrait d'orchestre préalablement enregistré, avant de passer les fréquences et amplitudes dans un moteur de synthèse qui resynthétise ces spectres sur une sonorité de petits cloches. Durant l'exécution de la pièce, ces clochettes s'intègrent dans l'orchestration car leurs spectres sont liés.

Nous allons utiliser l'information issue des partiels pour définir des bandes de fréquence à garder ou à effacer dans un spectre. Chaque partiel trouvé durant l'analyse est utilisé pour créer une bande de fréquence ayant pour amplitude l'amplitude du partiel, pour fréquence centrale, la fréquence de ce même partiel, et une largeur de bande à spécifier.

Fig. 3.31 A gauche, schéma des partiels; à droite, bande de filtre autour de ces partiels avec une largeur de bande définie

Cet exemple va de nouveau servir pour créer un lien entre l'écriture instrumentale et la partie électroacoustique. Cette fois-ci, ce lien n'est plus une mélodie abstraite, mais se base sur les paramètres acoustiques du son qui vont donner leurs caractéristiques au traitement sonore. Une petite phrase pour piano a été notée et enregistrée[118].

[117] Joshus Fineberg - *Empreintes*, pour 14 instruments et dipositif électronique, Max Eschig, Paris 1995
[118] Voir annexe 1, exemple 37.

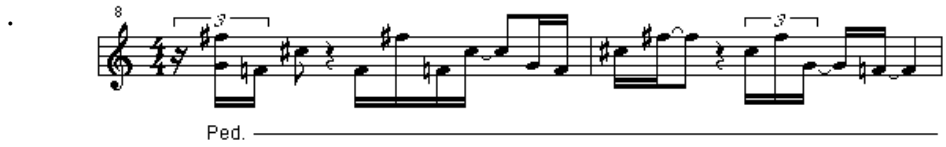



Fig. 3.32 Phrase pour piano

L'analyse des partiels de cet enregistrement nous donne les énergies les plus fortes dans le spectre. La fonction *partials-fbreakpoint* va permettre de les traduire en bandes de filtre. Prenons d'abord un exemple avec un bruit blanc.

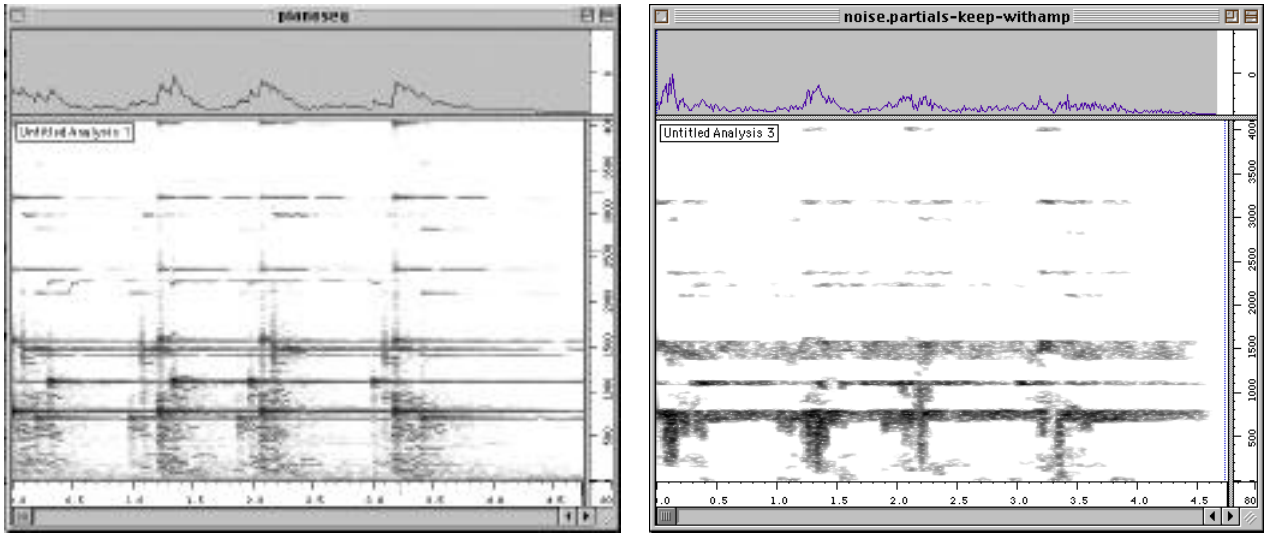


Fig. 3.33 A gauche, partiels retracés dans le spectre du piano; à droite, résultat du filtrage d'un bruit blanc par les bandes de fréquence correspondant aux partiels du piano

Le sonagramme de gauche montre le spectre de la séquence de piano avec le résultat d'analyse des partiels. Celui de droite affiche le spectre d'un bruit blanc après le filtrage en ne gardant que les bandes de fréquence dont l'amplitude correspond aux partiels du piano. Même si le résultat sonore[119] se rapproche du traitement d'un filtrage par convolution[120], notre approche est néanmoins plus flexible, car elle offre deux possibilités qui n'existent pas avec la *synthèse croisée source-filtre*. La première différence est liée au paramètre de la largeur de bande. En choisissant une largeur de bande plus grande, il est possible de garder plus d'énergie du son filtré autour des

[119] Voir annexe 1, exemple 38.

[120] Le traitement de la synthèse croisée du type *source-filtre*, également possible avec AudioSculpt, est en filtrage par convolution de deux spectres, c'est-à-dire que l'évolution spectrale d'un son est appliquée sur le spectre d'un deuxième son.

fréquences des partiels[121].

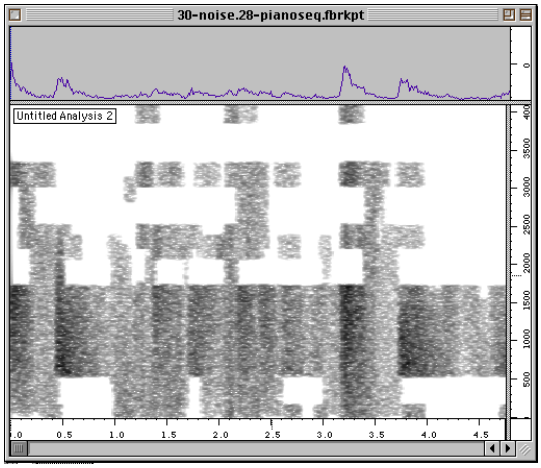


Fig. 3.34 Filtrage avec une largeur de bande de 200 Hz

Le deuxième avantage consiste à pouvoir effacer l'énergie dans les bandes correspondant aux partiels. Nous expérimenterons d'abord la méthode sur un bruit blanc, car le sonagramme affiche clairement l'effet de la procédure.

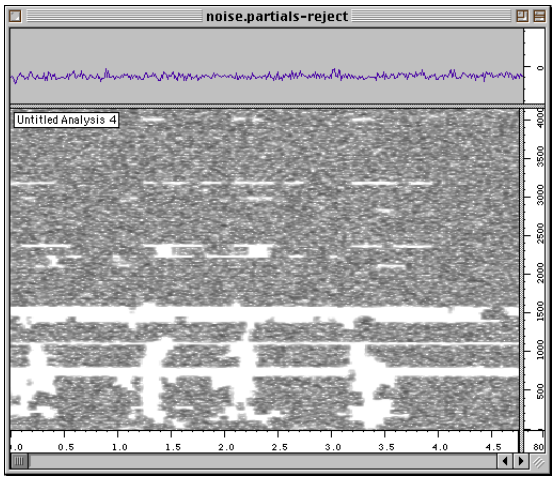


Fig. 3.35 Effacement de l'énergie des bandes de fréquence correspondant aux partiels du piano

[121] Voir annexe 1, exemple 39.

Le son du bruit blanc n'est guère altéré, car la majorité de son énergie dans le spectre reste inaffectée[122]. Cette approche présente l'intérêt de permettre l'application de paramètres du filtre sur le son qui a servi pour l'analyse des partiels. Il devient ainsi possible d'effacer l'énergie correspondant aux partiels les plus forts, même dans un son polyphonique ou inharmonique. Appliquons maintenant le filtrage à la séquence de piano et effaçons les partiels révélés par l'analyse.

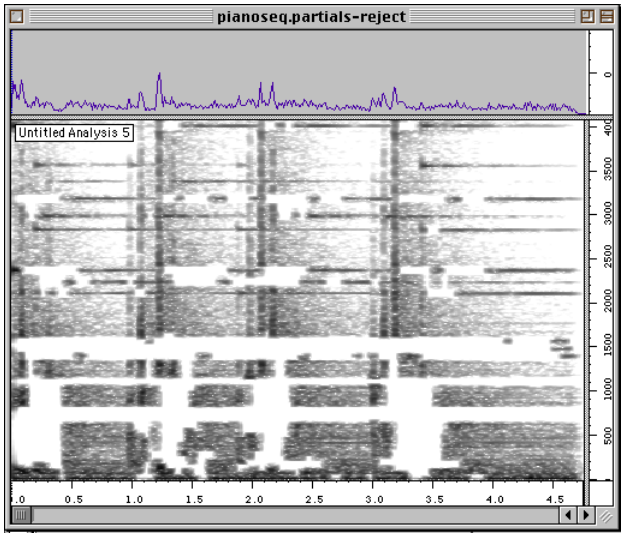


Fig. 3.36 Séquence de piano après filtrage de ses partiels

Le résultat sonore[123] ne garde que les zones spectrales dans lesquelles aucun partiel n'a été trouvé au cours de l'analyse. Ces parties du spectre correspondent à la partie bruiteuse d'un son complexe car les partiels portant l'information des hauteurs ont été effacés. Une comparaison avec d'autres méthodes de séparation des composants harmoniques et bruiteux, l'algorithme *additive* du programme *Diphone*[124] par exemple, ou le traitement *spectral extractor* du programme *SoundHack*[125], nous permet d'établir que notre approche offre un accès plus flexible au contrôle de cette séparation. En effet, il est possible durant l'analyse des partiels dans *AudioSculpt* de choisir soit d'une façon globale, soit par édition très précise, quels partiels, donc quelles zones d'énergie,

[122] Voir annexe 1, exemple 40.
[123] Voir annexe 1, exemple 41.
[124] Programme d'analyse et de synthèse développé à l'IRCAM.
[125] Programme de traitement sonore développé par Tom Erbe.

vont être exportés vers la bibliothèque « OM-AS » pour être ensuite transformés en paramètres de filtrage.

Nous allons maintenant pour terminer ce chapitre étudier le résultat de ce lien entre écriture instrumentale et partie électroacoustique. La phrase pour piano et le résultat du filtrage qui ne garde que la partie bruiteuse sont joués ensemble[126].

L'intervention sur les composants du spectre selon des règles formalisées nous semble une possiblité riche d'avenir pour créer des timbres qui suivent dans leur structure interne les paramètres d'une pièce. Outre ce lien entre instrumetal et électroacoustique, cette méthode offre également la possibilité de composer l'intérieur des sons utilisés dans la musique pour bande.

3.2.3 La formalisation de la durée d'un son

Comme nous l'avons vu a travers l'exemple d'*Epitaph für Aikichi Kuboyama* d'Herbert Eimert, pouvoir changer la durée d'un son sans affecter sa hauteur a intéressé les compositeurs dès que des moyens techniques permettant de séparer les paramètres physiques hauteur et durée ont été disponibles. Ce qu'H. Eimert réalisait en 1960 grâce au *Zeitregler* est aujourd'hui réalisable en utilisant le vocodeur de phase. Le programme *AudioSculpt* nous permet de changer la longueur d'un fichier son non seulement selon un facteur fixe, mais aussi de façon dynamique — ce qui signifie que le facteur de dilatation/compression peut changer au cours du traitement sonore. Comme pour la transposition, les paramètres décrivant l'évolution de la dilatation sont passés au moteur de calcul sous forme d'un fichier texte, présenté en deux colonnes. La première exprime les temps absolus dans le fichier original, la deuxième, le facteur de dilatation.[127].

[126] Voir annexe 1, exemple 42.

[127] Un facteur 0.5 indique par exemple une compression de moitié de la durée originale; un facteur 2.0 indique une dilatation doublant la longueur originale; un facteur 1.0 signifie une absence de compression.

Le dernier groupe de fonctions de la bibliothèque « OM-AS » que nous allons décrire ici sert à traiter la durée des sons. Dans la méthode décrite ci-dessous, un lien temporel très intéressant entre une mélodie instrumentale et le fichier son traité peut être obtenue.

Beaucoup d'algorithmes peuvent être utilisés pour générer des facteurs de dilatation/compression — des séries de *fibonacci*[128] par exemple. Nous allons utiliser dans cette étude une fonction aléatoire calculant ces facteurs. Le calcul se réalise en deux étapes. On génère tout d'abord des facteurs de dilatation aléatoires avant de les redimensionner pour atteindre une durée exacte à la sortie. Sans cette deuxième étape, les résultats sonores seraient toujours de différentes longueurs. Prenons un exemple. Le son original a une durée de 3 secondes. Le fichier contenant les valeurs aléatoires est le suivant :

temps	facteur
0.0	1.0
1.0	2.0
2.0	3.0
3.0	1.0

Étant donné qu'*AudioSculpt* interpole entre les valeurs de deux lignes successives, le facteur de dilatation augmente successivement de 1.0 à 2.0 entre le début du son et le temps absolu 1.0 seconde. Il en résulte dans le fichier de sortie une nouvelle durée de 1.5 secondes. Entre le temps 1.0 et 2.0 secondes, le facteur de dilatation passe de 2.0 à 3.0. Avec cette progression, au temps absolu 2.0 secondes dans le fichier son original correspond une valeur de 4.0 secondes dans le fichier de sortie. Entre 2.0 et 3.0 secondes, le facteur progresse de 3.0 à 1.0. La durée de notre son original a été modifiée d'une façon dynamique pour atteindre finalement une durée de 6 secondes. Considérons maintenant un autre résultat d'un fichier aléatoire :

temps	facteur
0.0	1.0
1.0	0.5
2.0	0.6
3.0	3.1

[128] Série de chiffres dans laquelle chaque valeur est égale à la somme des deux nombres précédents: 0 1 1 2 3 5 8 etc., baptisée du nom de son inventeur Leonardo Fibonacci (1175-1240).

Après l'application de ces paramètres, le nouveau son a une durée de 3.132 secondes. Nous voyons qu'il est donc difficile de prévoir la longueur du son après l'application des paramètres aléatoires, car un calcul trigonométrique est nécessaire pour prendre en compte la progression temporelle du facteur. Cette opération étant facile à calculer pour l'ordinateur, nous la cachons dans la fonction *stretch-dyn-exact*. Cette fonction calcule tout d'abord une série de valeurs de dilatation aléatoires et les redimensionne pour atteindre une durée absolue définie par l'utilisateur. Il est donc possible grâce à cette méthode d'appliquer des dilatations et compressions à l'intérieur d'un son tout en obtenant un résultat d'une durée précise.

Ce paradigme est important dans le cas d'une approche compositionnelle qui remixe différents résultats de dilatation aléatoire pour obtenir des masses sonores. Reprenons la séquence de marimbaphone[129] pour illustrer cette démarche. Voici le son original dans une représentation amplitude/temps.

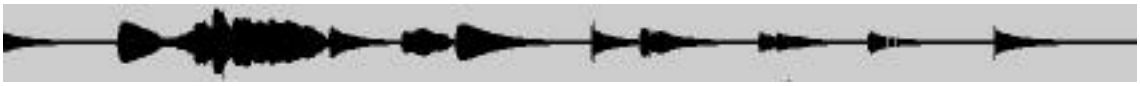


Fig. 3.37 Phrase de marimbaphone selon les axes amplitude/temps

Nous allons appliquer à cette séquence une première série de valeurs de dilatation, générée par la fonction *stretch-dyn-exact*. La longueur de la séquence originale est de 10.13 secondes. Nous appliquons une dilatation/compression aléatoire permettant de conserver cette durée initiale — autrement dit, une compression et dilatation aura lieu à l'intérieur de la séquence sans affecter sa durée totale. Voici les valeurs de dilatation/compression et le fichier sonore résultant[130].

[129] Voir annexe 1, exemple 31.
[130] Voir annexe 1, exemple 43.

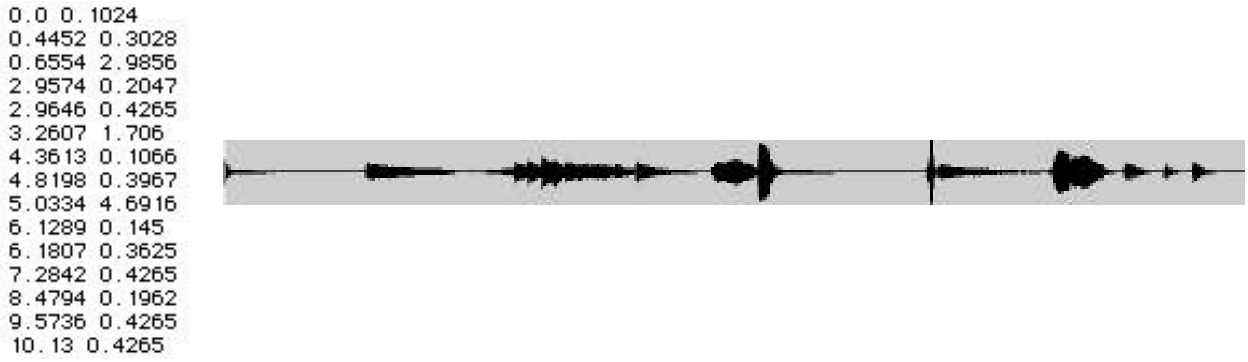


Fig. 3.38 Premier exemple d'une dilatation/compression aléatoire

Si nous utilisons la fonction *stretch-dyn-exact* une seconde fois, les valeurs temporelles et les facteurs de dilatation/compression sont différents. Ils sont néanmoins dimensionnés de telle sorte que la durée totale du nouveau son[131] sera toujours de 10.13 secondes.

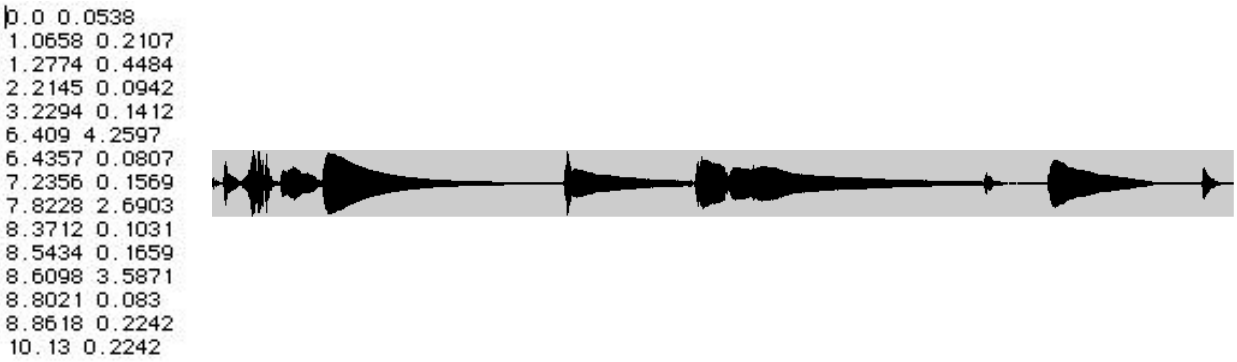


Fig. 3.39 Autre exemple d'une dilatation/compression aléatoire

Le but de cette méthode est de répéter la procédure huit fois avant de remixer les résultats obtenus pour parvenir à une matière sonore aléatoire au niveau de l'évolution des rapports temporels entre les huit versions, tout en suivant néanmoins la progression globale des hauteurs de la séquence du marimbaphone[132].

[131] Voir annexe 1, exemple 44.
[132] Voir annexe 1, exemple 45.

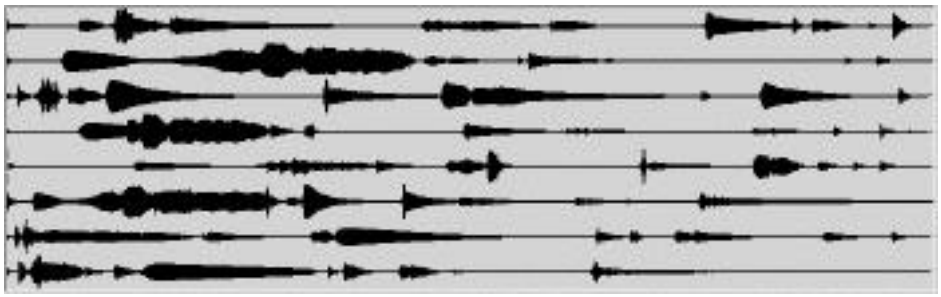


Fig. 3.40 Huit résultats différents de la dilatation/comüpression du même fichier son

Elle sera ensuite utilisée pour être diffusée pendant que le marimbaphone la jouera sur scène[133]. Cette approche compositionnelle permet de faire un lien très intéressant entre la séquence exécutée sur instrument et la partie électroacoustique. L'électronique n'a pas à simuler l'action de l'instrument ou à y repondre comme c'est le cas avec le traitement sonore en temps réel. En effet, en utilisant la méthode présentée ici, les hauteurs du marimbaphone peuvent apparaître dans la partie électroacoustique avant même d'être jouées sur l'instrument. Le lien se fait sur deux plans, le timbre de l'instrument est reconnaissable dans le fichier son, et les hauteurs suivent les hauteurs de la séquence du marimbaphone, même si leurs attaques sont distribuées aléatoirement dans le temps. Il est même envisageable de diffuser les huit fichiers de dilatation sur différents haut-parleurs pour donner une dimension spatiale à la partie électroacoustique.

En résumé, appliquer les mêmes paramètres à l'écriture instrumentale et au traitement sonore permet de créer un rapport particulièrement étroit entre ces deux domaines. Nous sommes conscients que ces méthodes ne peuvent pas s'appliquer dans tous les cas. Comme nous l'avons écrit auparavant, les résultats sonores sont toujours l'interaction entre l'évolution du spectre du son à traiter et les paramètres appliqués. Il faut donc connaître ces spectres pour pouvoir intégrer ces méthodes de travail. Manipulant les sons suivant des règles bien définies que la combinaison de la CAO et du traitement permettent d'observer, cette bibliothèque peut ouvrir des pistes inexplorées pour intégrer le traitement dans l'écriture.

[133] Voir annexe 1, exemple 46.

3.3 Exemple d'application des paramètres de filtrage dans la pièce *Sculpted Implotion* de Ketty Nez

Après avoir décrit dans les chapitres précédents quelques méthodes d'application des paramètres compositionnels au traitement sonore, nous allons étudier deux œuvres pour voir maintenant comment deux compositeurs conçoivent et réalisent le lien entre écriture et traitement. Nous avons vu que l'outil informatique proposé par l'auteur permet de transformer des paramètres de hauteur, de durée et de dynamique en paramètres contrôlant des filtres, un processus de transposition ou de dilatation/compression temporelle.

La compositrice américaine Ketty Nez, étudiante du « Cursus de composition et informatique musicale » 1998/1999 de l'Ircam, a réalisé au cours de cette période la pièce *Sculpted Implotion* pour cor et bande à huit pistes. Nous allons décrire ici quelques méthodes de travail utilisées pour réaliser la partie électroacoustique, ce qui permettra notamment de voir comment un matériau sonore au contenu harmonique bien défini a été développé en filtrant des bruits naturels, tels ceux de la pluie ou de la mer.

Pour pouvoir obtenir des hauteurs précises dans des sons filtrés, il est nécessaire de disposer au départ de spectres riches et constants dans le temps. Ce n'est en effet que lorsque les fréquences dans le spectre concordent avec les bandes de fréquence définies par le filtre qu'un résultat sonore contenant ces hauteurs peut être obtenu. Ceci a amené K. Nez à choisir pour l'extrait utilisé comme premier exemple un mixage entre le bruit de la pluie et le bruit de la mer - ces sons ont une morphologie spectrale plus intéressante que celle du bruit blanc, tout en ayant des fréquences réparties sur l'ensemble du spectre et une énergie sonore constante. Ce choix permet par la suite à la compositrice de réaliser des séquences de hauteurs précises en obtenant par filtrage des sons qui gardent leur qualité granuleuse tout en permettant de manipuler leurs hauteurs. L'idée directrice consiste à partir de séries de notes pour générer des séquences polyphoniques qui sont ensuite traduites en fréquences de filtrage pour traiter les sons naturels. Les séquences

polyphoniques du premier exemple sont formées de deux séries de notes, pouvant potentiellement être utilisées dans la ligne de cor.

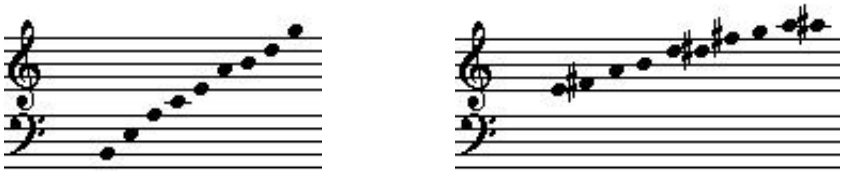
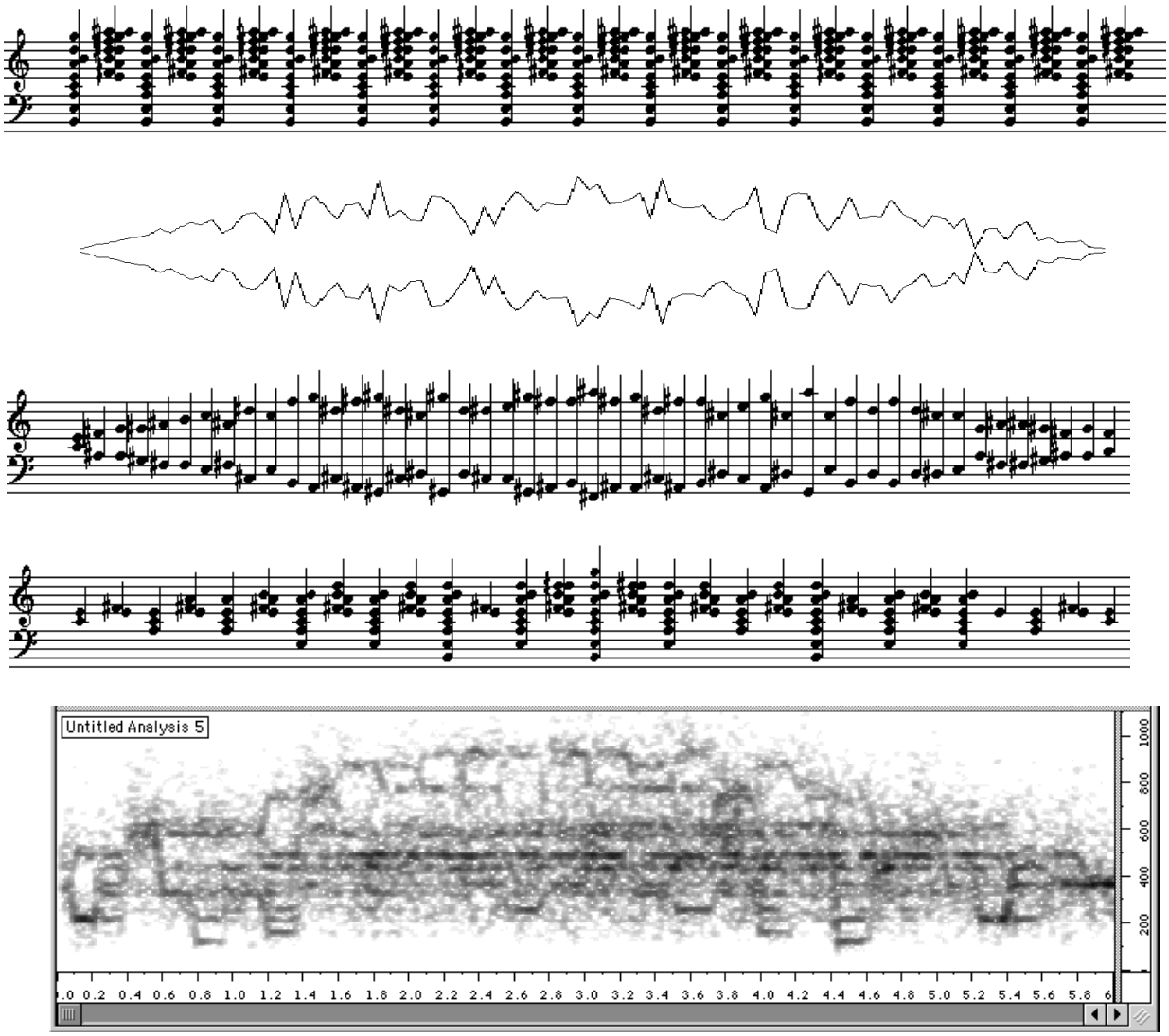



Fig. 3.41 Les deux séries de notes à la base de la séquence polyphonique

À partir de ces deux séries, une suite de trente accords est générée dans *OpenMusic*, en alternant systématiquement les notes de la première série avec celles de la deuxième (cf. schéma 3.42a). Une courbe de forme globale gaussienne est ensuite calculée, avant de lui appliquer une déviation aléatoire. Puis cette courbe et son inversion (cf. fig. 3.42b) sont traduites sous forme de hauteurs d'une mélodie à deux voix (cf. fig. 3.42c), qui vont servir comme des bornes pour délimiter la première séquence — autrement dit, la première séquence n'use que des hauteurs qui se trouvent entre ces deux lignes mélodiques. ll en résulte une altération des deux accords, dont les voix supérieures et inférieures suivent la fonction gaussienne (cf. fig. 3.42d).

Ces hauteurs sont ensuite traduites sous forme de paramètres pour un filtre formantique. Ce type de filtre définit un formant pour chaque hauteur de la séquence, sachant que la fréquence centrale du formant correspondant à la fréquence de la note. En choisissant la largeur de bande de ces formants, il est possible de définir dans quelle mesure le filtre laissera passer l'énergie autour de cette fréquence centrale. Une largeur de bande réduite laisse passer une bande de fréquences moins large - on obtient alors une notion de hauteur définie. Une largeur de bande plus grande au contraire laisse passer des bandes de fréquences plus larges, d'où une moindre définition des hauteurs.



De haut en bas, Fig. 3.42a, 3.42b, 3.42c, 3.42d et 3.42e.

La figure 3.42e présente le sonagramme du bruit d'eau filtré par la séquence de notes présentée ci-dessus (Fig. 3.42d)[134]. La compositrice ayant choisi une largeur de bande ni particulièrement réduite ni particulièrement large, elle obtient un son qui offre des hauteurs définies tout en gardant quelques qualités sonores du son original.

[134] Voir annexe 1: exemple 47 est le mixage du bruit de la pluie avec le bruit de la mer; exemple 48 est le résultat du filtrage.

L’exemple suivant va nous permettre d’examiner la question de la largeur de la bande de façon encore plus détaillée. Pour Ketty Nez, elle devient le paramètre décisif pour trouver un équilibre entre une hauteur précise par filtrage d’un côté et, de l’autre, une largeur de la bande très grande, laissant passer par le filtre beaucoup d’énergie ce qui permet de garder fidelement le grain du son original.

Examinons tout d’abord le processus de CAO qui a permis de calculer une séquence de notes par la suite transformée en paramètres de filtrage. Ayant défini un accord initial de six notes et deux notes d’arrivée, la compositrice utilise une interpolation linéaire pour aller de l’un à l’autre de la façon suivante: les deux notes les plus aiguës de l’accord (« la 4 » et « re 4 ») vont interpoler vers le « si 4 »; les quatre notes les plus graves (« fa# 3 », « do# 3 », « do# 2 » et « re# 1 ») vont interpoler vers le « la# 3 ». Elle affecte ensuite chaque processus d’interpolation par une perturbation différente.

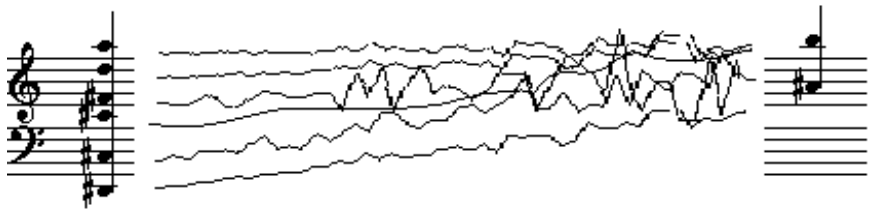


Fig. 3.43 Les processus d’interpolation et leurs perturbations

Ce processus lui permet d’obtenir une série d’accords qui commence comme il se doit avec l’accord initial pour arriver sur les deux notes définies par une suite d’accords de six notes dont les hauteurs aléatoires obéissent globalement à un glissando vers l’aigu.

Fig. 3.44 La séquence d’accords - résultat de cet processus d’interpolation.

Une fois ces deux notes atteintes, le processus est renversé pour revenir à l'accord initial, en passant de nouveau par un processus d'interpolation perturbée.

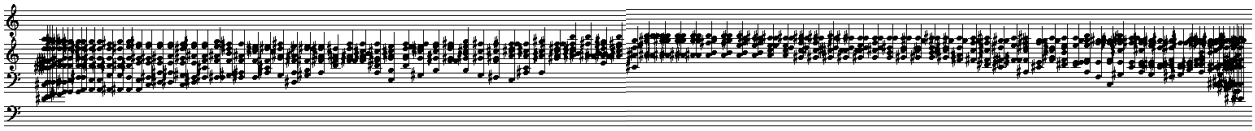



Fig. 3.45 La séquence d'accords complete

Cette séquence de hauteurs a été ensuite traduite en fréquences pour un *band filtre*, en utilisant la bibliothèque « OM-AS ». Le son source est un mixage des sons d'une fontaine et d'une brosse à dents en action[135]. Comme pour le premier exemple, le son est riche, et son énergie dans le temps est constante.

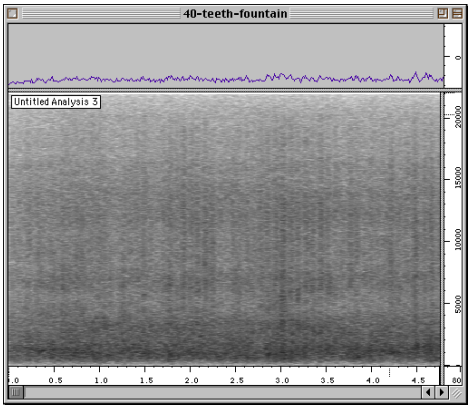


Fig. 3.46 Spectre du son d'eau

Le filtrage se fait d'abord avec une largeur de bande de 150 Hz; elle laisse encore passer suffisamment de composants spectraux du son source pour permettre de reconnaître son grain[136].

[135] Voir annexe 1: exemple 49.
[136] Voir annexe 1: exemple 50.

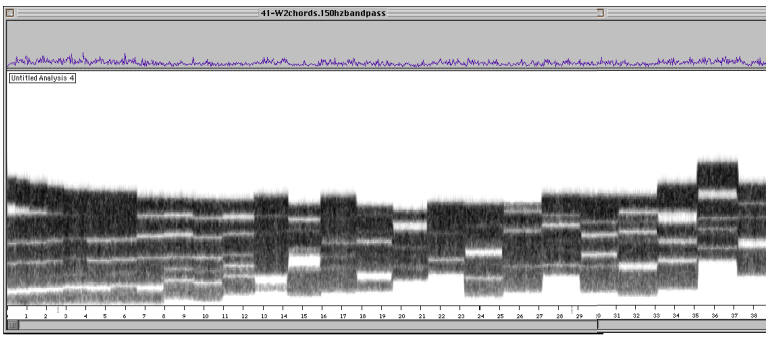


Fig. 3.47 Filtrage avec une largeur de bande de 150 Hz

Utiliser la même séquence avec une largeur de bande de 3 Hertz permet d'obtenir un son qui se rapproche plutôt de la synthèse de par ses qualités sonores, car les bandes filtrées sont tellement étroites qu'elles sont comparables avec des sons sinusoïdaux[137].

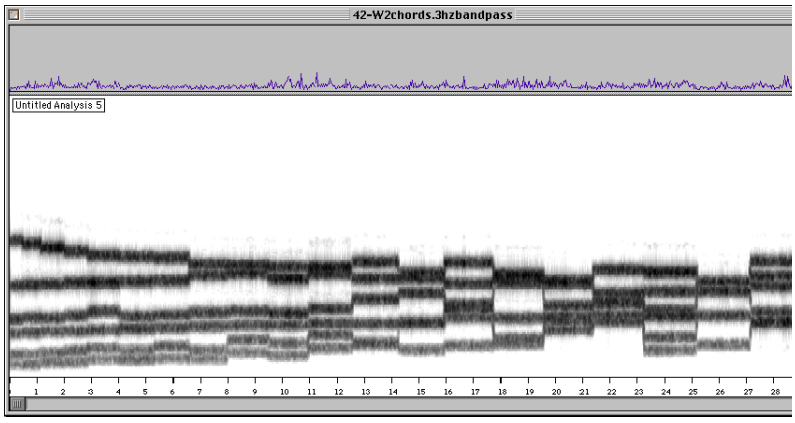


Fig. 3.48 Filtrage avec une largeur de bande de 3Hz

La largeur de bande devient donc le paramètre qui permet de definir une large gamme de résultats possibles. Celle-ci va de sons bruiteux gardant les qualités spectrales du son filtré avec une hauteur vague, à des sons porteurs d'une structure mélodique et harmonique mais ayant complètement perdu leur propre spectre, transformé en une suite d'étroites bandes de fréquence.

[137] Voir annexe 1: exemple 51.

Pour conclure cette sous-partie dédiée à la compositrice K. Nez, nous allons étudier comment elle parvient aux sons finalement présentés dans la partie électronique de sa composition.

La séquence polyphonique (fig. 3.45a) été traitée de façon à faire de chacun de ses accords un arpège. Les hauteurs résultantes fourniront les fréquences utilisées comme paramètres pour un *breakpoint filter*.

Fig. 3.49 Séquence des arpèges

La largeur de bande choisie étant réduite, le filtrage du son de départ donne une séquence mélodique qui ne permet plus de faire le lien avec le son source[138]. La compositrice remixe lors de la dernière étape de son travail les trois résultats obtenus par filtrage (exemples 50, 51 et 52) en ajoutant le son original, à un très faible volume sonore. Elle obtient ainsi une séquence conservant une référence à sa source, tout en ayant une structure mélodique et harmonique composée[139].

[138] Voir annexe 1: exemple 52.
[139] Voir annexe 1: exemple 53.

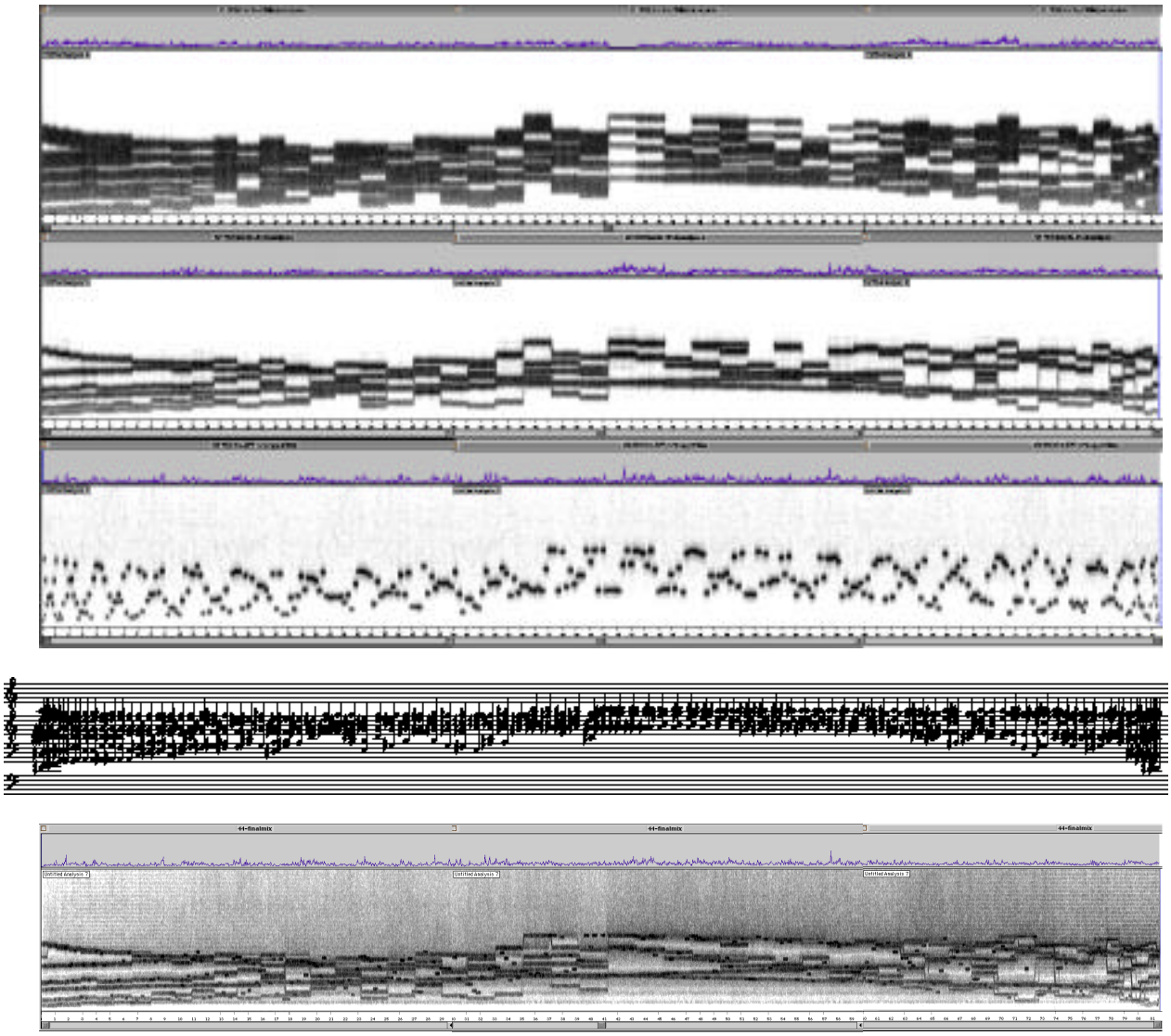


Fig. 3.50 Les differents étapes et le frésultat final

En expliquant quelques-unes des méthodes de travail employées par Ketty Nez, nous avons pu voir comment le traitement des sons naturels a été guidé par des processus d'écriture formalisés. Elle transforme ses sons en leur conférant une évolution mélodique et harmonique en harmonie avec l'écriture pour le cor. Le paramètre de la largeur de bande lui permet de délimiter un champ de résultats sonores entre hauteur précise d'une part et son original reconnaissable d'autre part.

3.4 Exemple d'application des paramètres de transposition dans notre pièce *Sieben Stufen*

Sieben Stufen, pièce électroacoustique pour bande à quatre pistes dont le cœur est le poème Verfall de Georg Trakl, a été réalisée durant notre année passée à l'Ircam dans le cadre du « Cursus de composition et informatique musicale » en 1994-1995. Ce n'est pas une pièce de fin d'année mais elle a cependant été réalisée entre octobre 1994 et février 1995 comme un exercice de traitement sonore[140]. De nombreuses méthodes de formalisation du traitement sonore sont utilisées dans cette pièce; nous étudierons dans ce chapitre un exemple concernant la transposition.

Tout le matériau sonore de cette pièce provient du poème de G. Trakl, utilisé tel quel ou transformé. Le texte allemand et sa traduction française ont tout d'abord été enregistrés dans leur intégralité, avant qu'une série basée sur des mots isolés chantés par une soprano sur deux accords ne soit développée. Pour ce faire, quatre couples de mots allemand-francais ont été choisis à la fois pour leur signification sémantique et pour leurs qualités phonétiques (Verfall-ruine ; Abend-au soir ; Glocken-cloches ; Vögel-oiseau). Puis les quatre mots allemands ont été enregistrés chacun sur les sept notes d'un accord, les quatre mots français, sur les sept notes d'un autre accord, ce qui donne un total de 54 courts fichiers son.

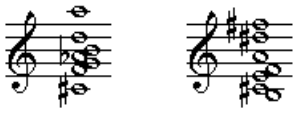


Fig. 3.51 À gauche : accord pour les quatre mots allemands; à droite accord pour les quatre mots fraçaise.

La pièce est divisée en sept parties ; la longueur de chacune de ces parties repond à la série de proportions suivante : 12-10-2-6-4-8-1. Ces sept parties sont suivis de deux autres sections, une présentant le poème récité en allemand et en français, et une conclusion désignée par le terme de « retro-coda », compression temporelle des sept parties jouées à l'envers. Après avoir

[140] La composition a obtenue le deuxième prix au concours international de musique électronique CIMESP Sao Paulo en 1995.

entendu le poème dans sa totalité, cette « retro-coda » permet de parcourir la pièce renversée en accélère, de la septième section à la première.

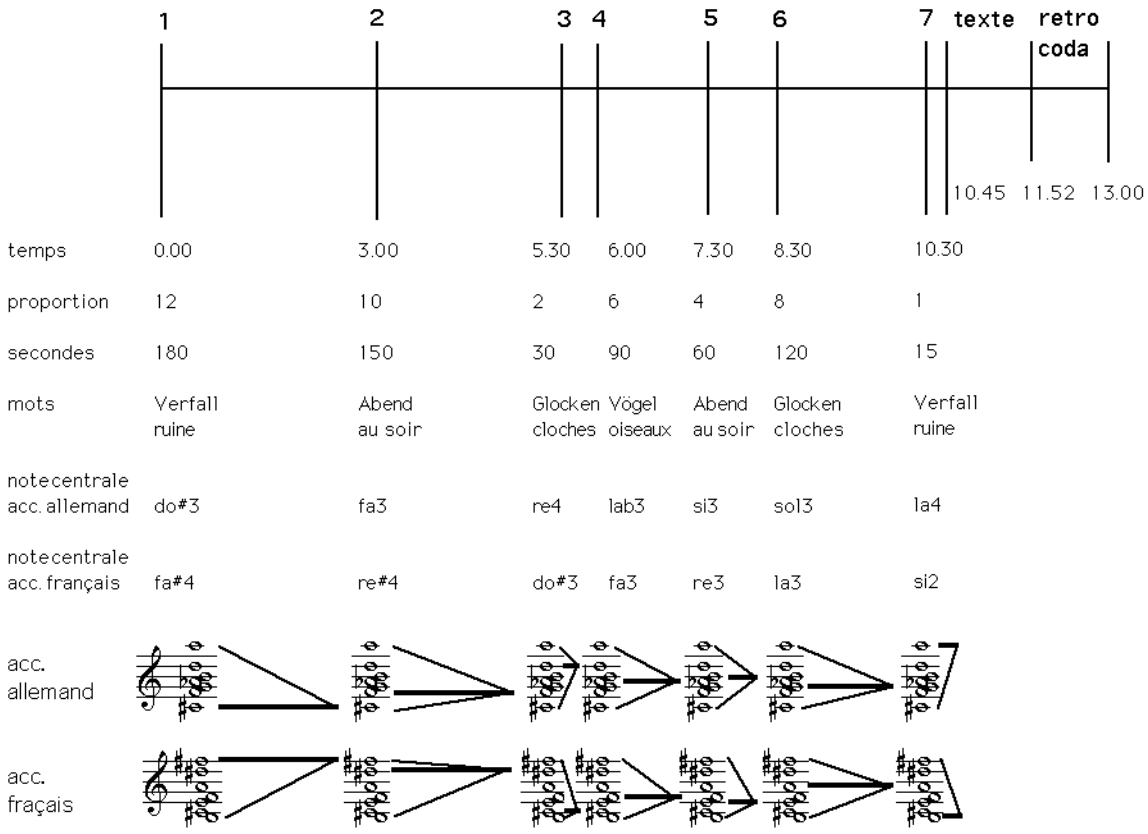


Fig. 3.52 Schéma de forme

Nous allons nous concentrer maintenant sur un exemple de transposition et étudier une méthode de travail appliquée dans les sept parties pour créer des glissandi. À chaque section de la pièce correspondent deux notes principales, une tirée de l'accord « allemand », l'autre de l'accord « français ». Les sept notes de chaque accord vont glisser durant chaque section vers la note centrale de cette section.

Prenons tout d'abord l'exemple de la septième partie, à laquelle correspondent les mots *Verfall* et *ruine*. L'enregistrement en annexe permet pour commencer d'écouter ces deux mots sur

chaque note des deux accords[141]. Un facteur de dilatation a été appliqué à ces 14 sons pour que la durée de chacun soit égale à la durée de la septième partie (15 secondes)[142].

Ces 14 sons dilatés ont ensuite été transposés d'une façon pregressive pour qu'ils rejoignent au cours de la section la note centrale de cette dernière.

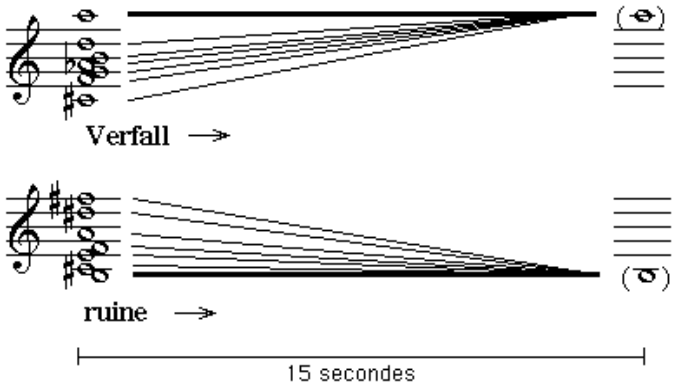


Fig. 3.53 Glissando de la septième section

Dans la section sept par exemple, le mot « ruine » enregistré sur le « fa# 4 » glisse durant 15 secondes vers le « si 2 »[143].

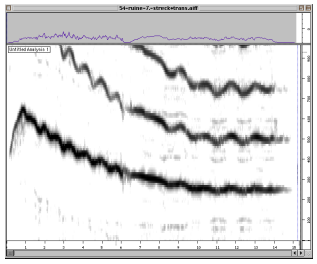


Fig. 3.54 Glissando durant 15 secondes du « fa# 4 » vers le « si 2 », obtenu par la transposition.

[141] Voir annexe 1: exemple 54 est l'enregistrement du mot *Verfall* sur les sept hauteurs de l'accord "allemand"; exemple 55 est l'enregistrement du mot *ruine* sur les sept hauteurs de l'accord "français".
[142] Voir annexe 1: exemple 56 est l'étirement du mot *Verfall* sur le "do# 3" pour atteindre une durée de 15 secondes.
[143] Voir annexe 1: exemple 57 est le glissando du "fa# 4" au "si 2" sur le mot *ruine.*

Les sept notes en glissando de chacun des accords ont ensuite été mixées, créant ainsi un glissando menant l'accord vers la note centrale.[144].

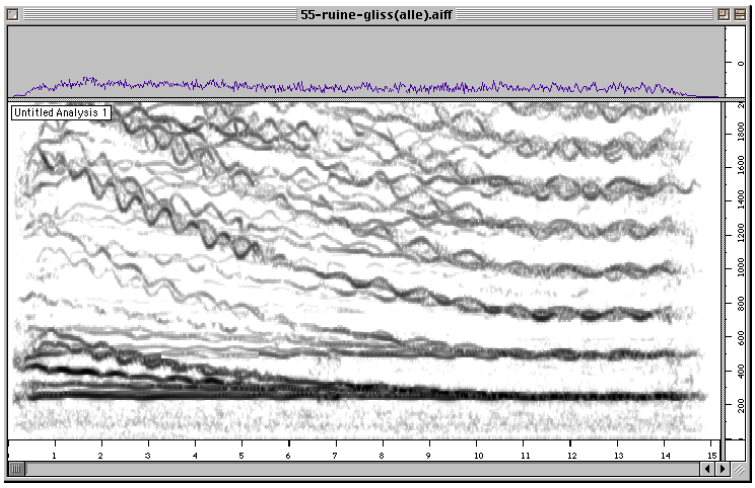


Fig. 3.55 Ce sonagramme montre le glissando de l'accord « français » pour la septième partie. Toutes les notes commencent sur les hauteurs originales de l'accord pour atteindre le « si 2 » durant 15 secondes.

Le même processus a été appliqué dans les sept parties à partir des mots correspondant à chaque section et en développant des glissandos allant vers les notes centrales. Ce matériau sera par la suite utilise dans d'autres processus de traitement, dont nous ne citerons que deux exemples ici. Dans la septième partie, les deux accords ont été soumis à une analyse spectrale. Avant de résynthétiser à nouveau les fréquences des *spectres à court terme*, elles ont été modifiées par le calcul de petites déviations aléatoires.[145].

Dans la sixième partie, le mot central allemand est *Glocken*. Écoutons d'abord le montage des sept notes glissant vers la note centrale « sol 3 » et ensuite sa dilatation sur 2 minutes, durée de cette sixième section.[146].

[144] Voir annexe 1: exemple 58 est le glissando complet sur le mot *ruine;* exemple 59 est le glissando complet sur le mot *Verfall*.

[145] Voir annexe 1: exemple 60 est le glissando sur le mot *ruine* après l'analyse et résynthèse*;* exemple 61 est le glissando sur le mot *Verfall* après l'analyse et résynthèse; exemple 62 est l'extrait de la pièce qui correspond à la septième partie et montre l'aparrission de ce traitement.

[146] Voir annexe 1, l'exemple 63 est le glissando sur le mot *Glocken;* exemple 64 est le glissando sur le mot *Glocken,*

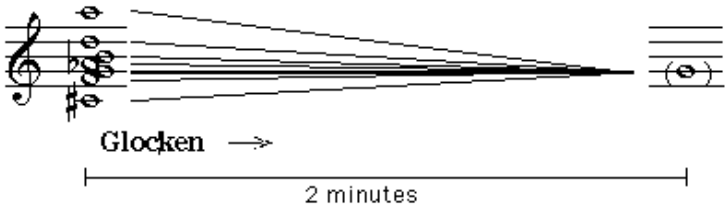


Fig. 3.56 Glissando de la sixième section

Le son dilaté servira ensuite pour le son filtré d'une *synthèse croisée source filtre*. Le poème récité en français est le son filtrant, donnant son évolution spectrale au son du glissando[147].

Nous avons vu dans ce chapitre quelques méthodes d'application des paramètres compositionnels au traitement sonore, notamment à la transposition. Les notes des accords, bases harmoniques de cette pièce, sont utilisées à la fois comme hauteurs principales et comme bornes délimitant des intervalles de transposition durant les glissandi.

Appliquer ces méthodes permet de générer un matériau sonore très cohérent. La voix, unique source sonore dans cette pièce, a été transformée par les mêmes processus formalisés qui ont également permis de développer la structure de cette pièce. Un lien entre la forme, l'harmonie, les durées et bien d'autres paramètres est établi pour faire de cette pièce un tout structuré par un ensemble d'idées précises. Ceci correspond à notre demande structurante qui voit dans le traitement non seulement un moyen d'altérer les sons, mais aussi une possible base pour déployer une structure globale. Nous cherchons à établir un lien intrinséque entre les méthodes d'écriture, les méthodes de formalisation et de traitement sonore pour que tous les éléments de la pièce soient liés par une forte structure.

---

dilaté sur deux minutes.

[147] Voir annexe 1, l'exemple 65 est le résultat de la synthèse croisée du glissando par le poème.

4. Conclusion

Cette étude présente donc un travail de recherche sur les méthodes d'application des paramètres compositionnels au traitement sonore, en utilisant plus particulièrement les fonctions développées pour la bibliothèque *« OpenMusic-AudioSculpt »*. Pour mieux comprendre comment ces concepts et techniques se sont développés, nous avons retracé dans une première partie leur apparition. Nous avons vu que l'élargissement de la palette sonore et le développement de la musique sur support depuis le début du XXe siècle ont donné lieu à une multitude d'initiatives et d'expérimentations. De nombreuses méthodes extrêmement diverses pour travailler le son sur support se sont développées, les progrès techniques ouvrant toujours de nouvelles voies aux techniques de composition, et les compositeurs cherchant constamment à accroître leur contrôle du monde sonore.

Les deux pièces étudiées dans la seconde partie - *Studie I* de Stockhausen et *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey - ont ensuite été l'occasion d'étudier plus en détail deux méthodes de travail et deux conceptions de la composition très différentes qui ont pour point commun l'utilisation de sons sur support. La troisième et dernière partie enfin a permis de présenter à travers la bibliothèque *« OpenMusic-AudioSculpt »* quelques voies de développement d'un outil informatique à la disposition des compositeurs. Il ne s'agit là que de quelques possibles si l'on prend en compte les potentialités de développement des techniques de composition actuellement. Cette bibliothèque pourrait elle-même être développée dans de nombreuses directions. Nous n'en citerons pour finir que quelques-unes.

Les fonctions de cette bibliothèque ne représentent bien sûr pas un ensemble exhaustif de tous les développement possibles. Elles ne forment qu'un début et mériteraient d'être approfondies dans le futur. Il serait intéressant d'étudier si d'autres concepts de formalisation d'écriture peuvent être utilisés pour fournir des paramètres au traitement sonore, et dans quelle mesure un tel lien serait porteur d'un sens musical.

Par ailleurs, la situation aujourd'hui d'un compositeur travaillant avec des sons sur support est caractérisée par le fait que la majorité du travail en studio est réalisée avec l'aide de l'ordinateur. Les possibilités d'analyse et de traitement sonores offertes sont maintenant innombrables et offrent en théorie du moins un champ de création infini au compositeur.

Cependant, dans la pratique, celui-ci est souvent dépendant de programmes informatiques développés par d'autres que lui. Ces programmes sont d'une certaine façon toujours en conflit avec les théories et pratiques du compositeur car ils possèdent un nombre fini de fonctions non extensibles par l'utilisateur. La recherche musicale menée dans plusieurs centres dans le monde a donc contribué à développer des outils « ouverts » avec des plate-formes adaptables aux besoins concrets et spécifiques des compositeurs, permettant de dépasser les programmes comportant seulement des fonctions fixes, aussi riches et perfectionnés soient-ils. Des « boîtes à outils » ouvertes ont donc pu être développées. Elles se prêtent à la fois à un élargissement par les compositeurs eux-mêmes des fonctions données d'une part, et d'autre part à une adaptation de ces outils aux méthodes personnelles des compositeurs à l'aide d'un large ensemble de fonctions pouvant être assemblées selon les besoins de l'utilisateur. Ces outils, tels *Patchwork* et *OpenMusic*, ont été largement utilisés durant les quinze dernières années. Cependant, ils sont utilisables essentiellement pour l'écriture instrumentale.

Notre bibliothèque est une première tentative pour appliquer au monde du traitement sonore les processus de formalisation d'écriture offerts par la CAO. Les fonctions de notre bibliothèque (quelques-unes ont été décrites dans la troisième partie) s'intégrent dans le logiciel *OpenMusic*, et peuvent ainsi rejoindre le large ensemble des bibliothèques déjà existantes (*Situation, Esquisse, Profiles* par exemple). Les paramètres compositionnels obtenus grâce à ces méthodes peuvent être ainsi combinés avec les fonctions de notre bibliothèque pour permettre un lien entre leurs méthodes compositionnelles et le traitement sonore. Ainsi, un environnement de travail tel *OpenMusic*, déjà familier à beaucoup de compositeurs, peut être élargi grâce à notre bibliothèque, ce qui permet de traduire des paramètres issus d'autres méthodes ou d'autres

formalisations en paramètres contrôlant des aspects des traitements sonores. Ces « autres méthodes » vont notamment des règles stochastiques aux règles combinatoires en passant par des processus de composition par règle.

Enfin, nous avons vu par ailleurs que cette bibliothèque peut être employée aussi bien dans le cadre de pièces pour bande seule que pour fournir une base commune aux parties instrumentale et électroacoustique de pièces mixtes. Nous n'avons pas pour autant exploré tous les modes d'utilisation possible de cet outil informatique. En effet, nous avions décidé au début de cette étude d'exclure la musique en temps réelle du cadre de notre recherche. Cela ne veut pas dire pour autant que cet aspect de la musique électroacoustique est définitivement fermé à la bibliothèque présentée. Cette recherche pourrait être poursuivie en explorant les potentiels des concepts jusqu'ici utilisés en temps différé dans le domaine du traitement en temps réel. De premières tentatives faites pour utiliser quelques fonctions de notre bibliothèque sur le logiciel *Max*, destiné au traitement des structures musicales en temps réel, nous ont montré qu'une telle voie est prometteuse.

Un autre élargissement des concepts proposés consisterait à réunir d'autres plate-formes de la CAO (*Common Music-Stella* par exemple) avec d'autres logiciels de traitement sonore comme *Modalys*, programme de synthèse à partir de modèles physiques, ou *Diphone*, programme intégrant l'analyse de la synthèse additive, ou encore le moteur de synthèse *Chant*, destiné à la production de sons percussifs et vocaux. Ces programmes d'abord conçus pour la synthèse offrent également des possibilités dans le domaine du traitement des sons existants. L'écriture formalisée pourrait donc permettre aux paramètres de ces programmes d'être contrôlés par des concepts d'écriture.

Ainsi plusieurs pistes d'élargissement peuvent être envisagées pour élargir la palette d'outils visant à offrir des moyens simples pour contrôler des processus de traitement complexes .

5. Bibliographie

5.1 Livres et journaux

[AGON, 1999] Agon C. - *OpenMusic : Un langage visuel pour la composition musicale assistée par ordinateur*, thèse pour l'obtention du grade de docteur en informatique, sous l'orientation de Jean François Perrot, Université de Paris 6, 1999.

[AGON et al., 1999] Agon C., Assayag G., Laurson M., Rueda C.- « Computer Assisted Composition at Ircam : PatchWork & OpenMusic », in *Computer Music Journal*, à sortir en automn 1999.

[APPLETON, 1989] APPLETON J. - *21st-century musical instruments — hardware and software*, Brooklyn, N. Y., University of New York, 1989.

[ASSAYAG, 1993] Assayag G. - « Cao : vers la partition potentielle », in *Les Cahiers de l'Ircam* 1 (3), La composition assistée par ordinateur, Juin 1993, pp. 13 — 41, IRCAM, Paris, 1993.

[ASSAYAG & AGON, 1996] ASSAYAG G., AGON C. - « OpenMusic Architecture », in *Proceedings of the ICMC96*, Hong Kong 1996.

[ASSAYAG & AGON 1998] ASSAYAG G., AGON C. - *A Visual Programming Environment for Music Composition*, IRCAM, Paris 1998.

[ASSAYAG, 1993] ASSAYAG G. - *OpenMusic (OM) 2.0 User's Manual and reference*, Ircam, Paris, 1998.

[BABONI-SCHILINGI, 1996] BABONI-SCHILINGI J. - *PatchWork Tutorials*, IRCAM, Paris, 1996.

[BABONI-SCHILINGI, 1997] BABONI-SCHILINGI J. - « Morphologie et structures musicales », in *Morphologie*, référence manual, IRCAM, Paris, 1997.

[BARBEAU, 1993] BARBEAU P. - *Vademecum de l'ingénieur en musique*, Springer-Verlag, Paris, Berlin, 1993

[BARRIERE, 1989] BARRIERE J.B. - « Écriture et modèles » in *Entretemps* n° 8, Paris, 1989.

[BAUMGART, 1966] BAUMGART Ch. — *Geschichte des Futurismus*, Rowohlt, Rheinbek bei Hamburg, 1966.

[BATTIER, 1981] BATTIER M. - *Le Compositeur et l'ordinateur*, IRCAM, Paris, 1981.

[BATTIER, 1988] BATTIER M. - *Elements d'informatique musicale*, Ircam, Paris, 1988.

[BATTIER, 1992] BATTIER M. - « Sculpter la transparence », in *Composition et Environnements Informatiques*, Les Cahiers de l'IRCAM — Recherche et Musique, Ircam, Paris, 1992.

[BATTIER, 1995a] BATTIER M. - « Europe, avis de recherche », *Résonance* nr. 9, octobre 1995, Ircam, Paris.

[BATTIER, 1995b] BATTIER M. - « Entre l'idée et l'œuvre : parcours de l'informatique musicale », in *Esthétique des arts médiatiques*, tome 1, sous la direction de Louise Poissant, presses de l'Université du Québec, Montréal, pp.319 - 335, 1995.

[BAYLE, 1990] BAYLE F. - *musique acousmatique. proposition.…… positions,* INA/GRM, Éditions Buchet/Chastel, Paris, 1993.

[BAYLE, 1993] BAYLE F. - *Pierre Schaeffer, l'œuvre musicale,* INA/GRM, Librairie Seguier, Paris, 1990.

[BENNETT, 1996] BENNETT G. et al. — *Esthétique et musique électroacoustique* : *Actes I,* 1995, Paris : Actéon, Mnémosyne, 1996.

[BOSSEUR, 1976] BOSSEUR J.Y. - « Der Futurismus und das Werk von Edgar Varèse », in *Der musikalische Futurismus,* ed. Otto Kolleritsch, Institut für Wertungsforschung et Universal Edition, Graz, 1976.

[BOSSEUR, 1993a] BOSSEUR J.Y. et BOSSEUR D. - *Révolutions musicales — La musique contemporaine depuis 1945,* Minerve, Paris, 1993.

[BOSSEUR, 1993b] BOSSEUR J.Y. - *John Cage*, Minerve, Paris, 1993

[BOSSEUR, 1996] BOSSEUR J.-Y. - *Vocabulaire de la musique contemporaine,* Minerve, Paris, 1996.

[BOULEZ, 1963] BOULEZ P. - *Penser la Musique Aujord'hui*, Ed. Gonthier, Paris, 1963.

[BOULEZ, 1981] BOULEZ P. - « L'in (dé) fini et l'instant », in *Le compositeur et L'ordinateur*, IRCAM, Paris, 1981, pp. 46-47.

[BOULEZ & CAGE, 1993] BOULEZ P. et CAGE J. - *The Boulez-Cage correspondence,* édité par Jean-Jacques Nattiez, Cambridge University Press, Cambridge, 1993

[BRECH, 1994] BRECH M. - *Analyse elektroakustischer Musik mit Hilfe von Sonagrammen,* P.Lang — Europäische Hochschulschriften, Francfort, 1994.

[BUSONI, 1983] BUSONI F. - « Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst (1907/1916) », in BUSONI F., *Von der Macht der Töne. Ausgewählte Schriften,* Leipzig, 1983.

[CAGE, 1981] CAGE J. - *For the birds. John Cage in conversation with Daniel Charles,* Ed. Marion Boyars, London, 1981.

[CAUSTON, 1995] CAUSTON R. - « Berio's'Visage'and the Theatre of Electroacoustic Music », *Tempo 194*, october 1995, pp. 15-21

[CHADABE, 1996] CHADABE J. - « The History of Electronic Music as a Reflection of Structural Paradigms », *Leonardo Music Journal,* Vol. 6, 1996, pp. 41-44

[CHADABE, 1997] CHADABE J. - *Electric Sound. The Past and Promise of Electronic Music,* Prentice Hall, New Jersey, 1997.

[CHEMMILIER et al., 1998] CHEMILLIER M., PACHET F., coordonnateurs — *Recherches et applications en informatique musicale,* Edition Hermes, Paris, 1998.

[CHION & REIBEL, 1976] CHION M., REIBEL G. - *Les musiques électroacoustiques,* INA/GRM ed. sud, Chaudoreille, 1976.

[CHION, 1991] CHION M. - *L'art des sons fixés ou La musique concrètement,* Editions Metamkine/Nota Bene/Sono Concept, Fontaine, 1991.

[CHION, 1999] CHION M. - *Le son*, Nathan, Paris, 1998.

[COMPUTER MUSIC JOURNAL 15,1991] *Dream machines for computer music : in honor of John R. Pierce's 80th birthday,* MIT Press, 1991.

[COMPUTER MUSIC JOURNAL 21,1997] *Synthesis and transformation,* MIT Press, 1997.

[CONTRECHAMPS n° 11] *Musiques Électroniques*, 1990. textes de J. Appleton, H. Davies, Ph. Manoury, J.-Cl. Risset, etc.

[COPE, 1991] COPE D. — *Computers And Musical Style*, Oxford University Press, Oxford, 1991.

[COPE, 1996] COPE D. - « Mimesis of Musical Stily and Structure », in *Symposium, Composition Modélisation Et Ordinateur,* Ircam, Paris, 1996.

[COPE, 1997] COPE D. - *New Directions in Music*, Williamc. Brown Publishers, Dubuque Iowa. 1989.

[COPE, 1997] COPE D. - *Techniques of the Contemporary Composer*, Schirmer Books New York ; London ; Singapore, 1997.

[DALBAVIE, 1981] DALBAVIE M. A. - « De l'écriture au timbre », in *Actes du Symposium « Systèmes personnels et informatique musicale »*, n.p., Ircam, Paris, octobre 1981.

[DALLET & BRUNET, 1996] DALLET S., BRUNET S. - *Pierre Schaeffer: Itinéraires d'un chercheur. Bibliographie commentée de l'œuvre éditée de Pierre Schaeffer*, Editions du Centre d'Etudes et de Recherche Pierre Schaeffer, Paris, 1996.

[DAVIES, 1991] DAVIES S. - *Musical Meaning And Expression*, Cornell University Press, Ithaca — New York, 1991.

[DE LA MOTTE-HABER, 1995] DE LA MOTTE-HABER H. — *Der Hörer als Interpret*, Frankfurt am Main, Berlin, Paris, 1995.

[DIRKS, 1998] DIRKS P. - *An Analysis of Jonathan Harvey's Mortuos Plango, Vivos Voco*, http ://www.acs.ucalgary.ca/~plconnel/harvey.html, n. p., 1998

[DOBSON, 1992] DOBSON R. - *A dictionary of electronic and computer music technology*, Oxford, New York, Oxford University Press, 1992

[DODGE, 1985] DODGE Ch. - *Computer music — Synthesis, composition and performance*, London Schirmer Books, Collier Macmillan, 1985.

[DÖHL, 1996] DÖHL R. - *Ansätze und Möglichkeiten künstlerischen Dialogs und dialogischer Kunst. Ein Überblick.*, http ://www.s.shuttle.de/buecherei/wien.htm, n. p., 1996.

[DOLSON, 1986] DOLSON M. - « The Phase Vocoder : A Tutorial », *Computer Music Journal*, vol. 10-4, 1996, pp. 14-27.

[DOLSON, 1989] DOLSON M. - « Fourier-Transform-Based Timbral Manipulations », in *Current Directions in computer Music Research*, p. 105 — 112, Max Mathews and John R. Pierce, eds. Cambridge, Mass : MIT Press, 1989.

[DUFOURT, 1981] DUFOURT H. - « L'Artifice de l'Ecriture », in *Critique* n° 408, pp. 465-477, Mai 1981, Ed. du Minuit, Paris, 1981.

[DUFOURT, 1988] DUFOURT H. - « Musique et psychologie : les éléments porteurs de forme » in *La Musique et Les Sciences Cognitives*, Pierre Mardaga, Liège, 1988.

[DUFOURT, 1991] DUFOURT H. - « Timbre et espace », in *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, pp.272-281, Textes réunis et présentés par Jean-Baptiste Barrière, Christian Bourgois Éditeur, IRCAM, Paris, 1991.

[DWYER, 1971] DWYER T. - *Composing with Tape Recorders,* Oxford University Press, London, 1971.

[EARGLE, 1990] EARGLE J. M. - *Music, sound, and technology*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.

[EIMERT & HUMPERT, 1973] EIMERT H., HUMPERT H.U. — *Das Lexikon der elektronischen Musik,* Regensburg, 1973.

[EMMERSON, 1986] EMMERSON S. - « The Relation of Language to Materials », in *The Language of Electroacoustic Music,* ed. Simon Emmerson, Macmillan Press, Houndmills, 1986

[ENTRETEMPS 10, 1992] *Musique et ordinateur,* Paris, avril 1992.

[ESCAL, 1984] ESCAL F. - *Le compositeur et ses modèles*, PUF, Paris, 1984.

[FATUS, 1989] FATUS C. - *Composition musicale et informatique,* Minerve, Paris, 1989

[FATUS, 1994] FATUS C. - *Vocabulaire des nouvelles technologies musicales*, Minerve, Paris, 1994

[FATUS, 1996] FATUS C. - *Les Signaux sonores comme matériaux des nouvelles techniques compositionnelles*, Mém. DEA : Musique et Musicologie du XXe siècle : Paris, EHESS, CID-RM (CNRS), IRCAM, 1996.

[FRISIUS, 1996] FRISIUS R. - « Pionier der akustischen Kunst — Ein Proträt von Pierre Schaeffer », *MusikTexte 62/63 Januar 1996,* MusikTexte GbR, pp.34-50, Köln, 1996.

[FRISIUS, 1997] FRISIUS R. - « Konkrete Musik und die Folgen », *Positionen 29,* Verlag Positionen, pp.20-25, Berlin, 1997.

[GERTICH et al., 1996] GERTICH F., GERLACH J., FÖLLMER G. - *Musik…, verwandelt. Das Elektronische Studio der TU Berlin 1953-1995,* Wolke, Berlin, 1996.

[GEORGAKI, 1998] GEORGAKI A. - *Problèmes techniques et enjeux esthétiques de la voix de synthèse dans la recherche et création musicale,* Thèse de doctorat : Musique et musicologie du XXe siècle : EHESS, Ircam-Centre Georges Pompidou, CID-CNRS, Paris, 1998.

[GERZSO, 1993] GERZSO A. — « Informatique et Musique », in *La Recherche* n°. 257 septembre 1993 volume XXIV, Paris, 1993.

[GRIFFITHS, 1995] GRIFFITHS P. - *Modern Music And After*, Oxford University Press, New York, 1995.

[GRONEMEYER, 1988] GRONEMEYER G. - « … jeder Klang kann musikalisches Material sein », *MusikTexte 23 Februar 1988,* MusikTexte GbR, pp.44-48, Köln, 1988.

[GUY, 1990] GUY L., STEELE J. - *Common Lisp, The Language,* Second Edition, Digital Press, USA, 1990.

[HANAPPE, 1995] HANAPPE P. - *Integration des représentations temps/fréquence et des représentations musicales symboliques,* DEA ATIAM sous la direction de Gérard Assayag, Ircam — Université Paris VI, 1995.

[HANAPPE, 1996] HANAPPE P. - *AudioSculpt, user's manual,* IRCAM, Paris, 1996.

[HANAPPE & ASSAYAG, 1998] HANAPPE P., ASSAYAG G., « Intégration des représentations temps/fréquence et des représentations musicales symboliques », in *Recherches et applications en informatique musicale,* sous la direction de Chemillier M. et Pachet F.,Edition Hermes, Paris, 1998

[HARVEY, 1975] HARVEY J. - *The music of Stockhausen, an introduction,* Faber & Faber, London, 1975.

[HARVEY, 1981] HARVEY J. - « Mortuos Plango, Vivos Voco, a realisation at IRCAM », *Computer Music Journal 5*, No. 4, pp. 22-24, Winter 1981.

[HARVEY, 1986] HARVEY J. - « The mirror of ambiguity », in *The Language of Electroacoustic Music,* ed. Simon Emmerson, Macmillan Press, Houndmills, 1986, pp. 175-190.

[HARVEY, 1991] HARVEY J. - « Le miroir de l'ambiguïté », in *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, pp.454-466, Textes réunis et présentés par Jean-Baptiste Barrière, Christian Bourgois Éditeur, IRCAM, Paris, 1991.

[HELMHOLTZ, 1863] HELMHOLTZ H.v. — *Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik,* Braunschweig, 1863, 6. Auflage 1913.

[HERISSION.1992] HERISSION G. - *L'Ordinateur comme instrument de représentation des structures musicales*, Mém. DEA : Musique et musicologie du XXe siècle : EHESS, CID-RM (CNRS), ENS-IRCAM, Paris, 1992.

[HILLER & ISAACSON, 1959] HILLER L., ISAACSON L. - *Experimental Music*, McGraw-Hill, New York, 1959.

[HILLER & ISAACSON, 1993] HILLER L., ISAACSON L. - « Musical Composition with a High Digital Computer », in *Machine Models of Music* — edited by S. M. Schwanauer and D. A. Levitt, pp. 9-21, MIT Press, London 1993.

[HOOKWAY, 1987] HOOKWAY Ch. — *Minds, machines and evolution -Philosophical Studies*, Cambridge University Press London, 1987.

[HUMPERT, 1987] HUMPERT H.U. - *Elektronische Musik. Geschichte-Technik-Komposition*, Schott, Mainz, 1987.

[INHARMONIQUES 3,1988], *Musique et Perception*, IRCAM, Paris, 1988.

[INHARMONIQUES 4,1988], *Mémoire et Création*, IRCAM, Paris, 1988.

[IRCAM.1992] *Composition et Environnements Informatiques*, Les Cahiers de l'IRCAM, Ircam, Paris, 1992.

[IRCAM.1993a] *La Synthèse Sonore*, Les Cahiers de l'IRCAM, Ircam, Paris, 1993.

[IRCAM.1993b] *La Composition Assistée Par Ordinateur*, Les Cahiers de l'IRCAM, Ircam, Paris, 1993.

[IRCAM.1994] *Espaces*, Les Cahiers de l'IRCAM, Ircam, Paris, 1994.

[Journal of New Music Research 27 Nr.1-2,1998] Special Issue : *Analysis of Electroacoustic Music*, Swets & Zeitlinger, 1998.

[KÄMPER, 1997] KÄMPER D. - « Pionier der neuen Musik — Herbert Eimert — Journalist, Komponist, Organisator und Förderer », *MusikTexte 69/70* April 1997, pp.36-40, MusikTexte GbR Köln, 1997.

[KEANE, 1980] KEANE D. - *Tape music composition*, Oxford University Press, London, 1980.

[KEENE, 1988] KEENE S. E. - *Obiect-Oriented Programming In Common Lisp A Programmer's Guide To Clos*, Addison-Wesley Publishing Company, Milano, 1988.

[KOENIG, 1991] KOENIG G.M. — *Ästhetische Praxis — Texte zur Musik*, 3 Bände, Pfau-Verlag, Saarbrücken, 1991.

[LAURSON, 1996a] LAURSON M. - *PatchWork A Visual Programming Language And Some Musical Applications*, Sibelius Academy, Helsinki, 1996.

[LAURSON, 1996b] LAURSON M. - *Pw-Constraints Reference Manual*, IRCAM, Paris, 1996.

[LEIPP, 1971] LEIPP E. - *Acoustique et musique*, Masson, Paris, 1971.

[LISTA, 1973] LISTA G. - *Futurisme. Manifestes-Proclamations-Documents.*, Édition l'Age d'Homme, Lausanne, 1973.

[LISTA, 1982] LISTA G. - *Abstraktion et modernité*, Éd. Trans/Form, Paris, 1982.

[LOY, 1989] LOY G. - « Composing with Computers — a Survey of Some Compositional Formalisms and Music Programming Languages », in *Current Directions in computer Music Research*, pp. 291 — 386, Max Mathews and John R. Pierce, eds. Cambridge, Mass : MIT Press, 1989.

[LUCIER, 1995] LUCIER A. - *Reflections. Inteviews, Scores, Writings*, MusikTexte, Köln, 1995

[MACHOVER, 1981] MACHOVER T. - « Le compositeur et l'ordinateur : quelques réflexions », in *Le compositeur et Lordinateur*, IRCAM, Paris 1981.

[MAIGUASHCA, 1991] MAIGUASHCA M. - « Spectre-harmonie-mélodie-timbre », in *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, pp.402-411, Textes réunis et présentés par Jean-Baptiste Barrière, Christian Bourgois Éditeur, IRCAM, Paris, 1991.

[MALHERBE, 1996] MALHERBE C. - « La sollicitation du réel : matériau, analyse, calcul, symbole, musique « in *Symposium, Composition Modélisation et Ordinateur*, Ircam, Paris, 1996.

[MALT, 1992a] MALT M. - *Pw-Alea Reference Manual*, Ircam, Paris, 1992.

[MALT, 1992b] MALT M. - *Pw-Chaos Refernce Manual*, Ircam, Paris, 1992.

[MALT, 1993a] MALT M. - *PatchWork Introduction*, Ircam, Paris, 1993.

[MALT, 1993b] MALT M. - *PatchWork Reference*, Ircam, Paris, 1993.

[MALT & POTTIER, 1993] MALT M., POTTIER L. - *Csound/Edit-Sco Refernce Manual*, Ircam, Paris, 1993.

[MCADAMS, 1998] MCADAMS S., DELIÈGE I. - *La Musique Et Les Sciences Cognitives*, Pierre Mardaga, Liége, 1988.

[MANNING, 1993] MANNING P. - *Electronic & Computer Music*, Clarendon Press, Oxford, Second Edition, 1993.

[MATHEWS et al., 1969] MATHEWS M. et al. — *The technology of computer music*, The MIT Press, Cambridge Mass., 1969.

[MESSIAEN, 1966] MESSIAEN O. - *Technique de mon langage musical*, Alphonse Leduc Éditions Musicales, Paris, 1966.

[MEYER-EPPLER, 1949] MEYER-EPPLER W. - *Elektronische Klangerzeugung, Elektronische Musik und synthetische Sprache*, Bonn, 1949.

[MOHOLY-NAGY, 1993] MOHOLY-NAGY L. - *Peinture Photographie Film*, Éditions Jacqueline Chambon, Nîmes, 1993

[MOLES, 1960] MOLES A. - *Les musiques expérimentales*, éd. du Cercle d'art contemporain, Paris, 1960.

[MOORE, 1990] MOORE F.R. — *Elements of Computer Music*, Prentice Hall, New Jersey, 1990.

[NONO, 1975] NONO L. - « Musik in der Fabrik », in *Luigi Nono. Texte. Studien zu seiner Musik*, Jürg Stenzl ed., Atlantis, Zürich, 1975.

[PASSUTH, 1982] PASSUTH K. - *Moholy-Nagy*, Verlag der Kunst, Dresden, 1982

[PIERCE, 1984] PIERCE J. - *Le son musical — musique, acoustique et informatique*, Pour la science, diffusion Belin, Paris, 1984.

[POTTIER, 1994a] POTTIER L. - *PW-Chant Library, Introduction, manuel de référence*, Ircam, Paris 1994.

[POTTIER, 1994b] POTTIER L. - *Chant Introduction*, Ircam, Paris 1994.

[PRATELLA, 1973] PRATELLA F. B. - « Manifeste des musiciens futuristes », in *Futurisme. Manifestes — Proclamations — Documents*, ed. Giovanni Lista, L'age d'homme, Lausanne, 1973, pp. 307-311.

[PRIEBERG, 1975] PRIEBERG F. K. - *Musica ex machina*, Trad. de « Musica ex machina. über das Verhältnis von Musik und Technik » par Paola Tonini, Torino, 1975.

[PRITCHETT, 1993] PRITCHETT J. - *The music of John Cage*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993

[RAFFMAN, 1993] RAFFMAN D. - *Language, Music and Mind,* Bradford Book MIT Press, Cambridge, 1993.

[REIBEL & PACQUETEAU, 1972] REIBEL G., PACQUETEAU J.-M. - « Les étapes de la réalisation en musique électro-acoustique », *Musique en jeu N° 8,* p. 29-36, 1972

[RIOTTE, 1996] RIOTTE A. - « Formalismes, modèles : un nouvel atout pour la composition et l'analyse », in *Création musicale et analyse aujourd'hui,* Masurgia, 1996 — Volume III — n°3., pp. 90-105, 1996

[RISSET, 1985] RISSET J. C. - « Le compositeur et ses machines, de la recherche musicale », in *ESPRIT* n°1667 mars, pp.59 - 76, Paris 1985.

[RISSET, 1991] RISSET J. C. - « Timbre et synthèse des sons », in *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, pp.239-260, Textes réunis et présentés par Jean-Baptiste Barrière, Christian Bourgois Éditeur, IRCAM, Paris, 1991.

[RISSET, 1992] RISSET J. C. - « The Computer as an Interface : Interlacing Instruments and Computer Sounds; Real-time and Delayed Synthesis; Digital Synthesis and Processing; Composition and Performance », *Interface* vol. 21, pp. 9-20, 1992

[ROADS, 1985a] ROADS C. - *Foundations of computer music*, The MIT Press, Cambridge (Mass.), 1985.

[ROADS, 1985b] ROADS C. - *Composers and the computer*, William Kaufmann, inc., Los Altos, California, 1985.

[ROADS, 1989] ROADS C. - *The Music Machine*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London 1989

[ROADS, 1996] ROADS C. - *The Computer Music Tutorial*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1996

[ROBERT, 1999] ROBERT M. - *Pierre Schaeffer : des Transmissions à Orphée,* l'Harmattan, Paris, 1999.

[RODET, 1985] RODET X. - *Formes : composition et ordonnancement de processus*, Rapport de recherche n° 36, Ircam, Paris, 1985.

[RUEDA, 1993a] RUEDA C. - *PatchWork-Programming Guide*, Ircam, Paris 1993.

[RUEDA, 1993b] RUEDA C. - *PatchWork-Architecture*, Ircam, Paris 1993.

[RUSCHKOWSKI et al., 1991] RUSCHKOWSKI A. et al. — *Die Analyse elektroakustischer Musik — Eine Herausforderung an die Musikwissenschaft ?*, DecimE, Berlin, 1991.

[RUSCHKOWSKI, 1998] RUSCHKOWSKI A. - *Elektronische Klänge und musikalische Entdeckungen*, Reclam, Stuttgart, 1998.

[RUSSOLO, 1973] RUSSOLO L. - « L'Art des bruits », in *Futurisme. Manifestes — Proclamations — Documents*, ed. Giovanni Lista, L'age d'homme, Lausanne, 1973, pp. 312-317.

[SAARIAHO, 1991] SAARIAHO K. - « Timbre et Harmonie », in *Le Timbre, Métaphore pour la Composition*, pp.412-453, Textes réunis et présentés par Jean-Baptiste Barrière, Christian Bourgois Éditeur, Ircam, Paris 1991.

[SABBE, 1973] SABBE H. - « Das Musikdenken von Karel Goeyvaerts in Bezug auf das Schaffen von Karlheinz Stockhausen », in *Interface*, vol. 2, 1973, pp. 101-113,

[SCHAEFFER, 1952] SCHAEFFER P. - *À la recherde d'une musique concrète*, Éditions du seuil, Paris, 1952.

[SCHAEFFER, 1966] SCHAEFFER P. - *Traité des objets musicaux*, Éditions du seuil, Paris, 1966.

[SCHAEFFER et al., 1998] SCHAEFFER P., REIBEL G., FERREYRA B. - *Solfège de l'objet sonore*, Éditions du seuil, Paris, 1966, réédition INA-GRM, 1998.

[SCHRADER, 1982] SCHRADER B. - *Introduction to electro-acoustic music*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New York, 1982

[SCHWANAUER, 1993] SCHWANAUER S.M., LEVITT A. - *Machine Models Of Music*, MIT Press, Cambridge, 1993.

[SMALLEY, 1986] SMALLEY D. - « Spectro-morphology and Structuring Processes », in *The Language of Electroacoustic Music*, ed. Simon Emmerson, Macmillan Press, Houndmills, 1986, pp. 61-93

[SMALLEY, 1993] SMALLEY D. - « Defining Transformations », *Interface*, vol. 22, pp.279-300, 1993

[SOLOMOS, 1996] SOLOMOS P.M. — *Iannis Xenakis*, P.O.Editions, Mercuès, 1996

[STOCKHAUSEN, 1963a] STOCKHAUSEN K. - « Situation des Handwerks (Kriterien der punktuellen Musik) », in *Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik — Band 1*, DuMont Buchverlag, Köln, 1963, pp. 17-23.

[STOCKHAUSEN, 1963b] STOCKHAUSEN K. - « Arbeitsbericht 1952/53 : Orientierung », in *Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik — Band 1*, DuMont Buchverlag, Köln, 1963, pp. 32-38.

[STOCKHAUSEN, 1963c] STOCKHAUSEN K. - « Situation des Metiers (Klangkomposition) », in *Texte zur elektronischen und instrumentalen Musik — Band 1*, DuMont Buchverlag, Köln, 1963, pp. 45-61.

[STOCKHAUSEN, 1964] STOCKHAUSEN K. - *Texte zu eigenen Werken, zur Kunst Anderer, Aktuelles — Band 2*, DuMont Buchverlag, Köln, 1964.

[STOCKHAUSEN, 1971] STOCKHAUSEN K. - *Texte zur Musik 1963-1970 Band 3*, DuMont Buchverlag, Köln, 1971.

[STOCKHAUSEN, 1978] STOCKHAUSEN K. - « Vier Kriterien der Elektronischen Musik » in *Texte zur Musik 1970-1977 Band 4*, DuMont Buchverlag, Köln, 1978, pp. 360-401.

[STOCKHAUSEN, 1989] STOCKHAUSEN K. - *Texte zur Musik 1977-1984 Band 5*, DuMont Buchverlag, Köln, 1989.

[STOCKHAUSEN, 1989] STOCKHAUSEN K. - *Texte zur Musik 1977-1984 Band 6*, DuMont Buchverlag, Köln, 1989.

[SUPPER, 1997] SUPPER M. - *Elektroakustische Musik & Computermusik*, Wolke, Berlin, 1997.

[TAUBE, 1994] TAUBE H. - *The ten most important things to know about Lisp*, Zentrum für Kunst und Medientechnologie, Karlsruhe, 1994.

[TAUBE, 1997] TAUBE H. - *Introduction to Common Music*, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1997.

[TOOP, 1981] TOOP R. - « Stockhausen's Electronic Works : Sketches and Work-Sheets form 1952-1967 », in *Interface*, vol. 10, 1981, pp. 149-197.

[TUTSCHKU, 1998] TUTSCHKU H. - *La librairie « OM-AS »*, Ircam, Paris, 1998

[VANDENHEEDE & HARVEY, 1985] VANDENHEEDE J., HARVEY J. - « Indentity and Ambiguity : the Construction and use of Timbral Transitions and Hybrids », in *ICMC Proceedings*, 1985.

[VARESE, 1983] VARESE E. - « Restrospective », *Ecrits*, Paris, Christian Bourgois, 1983

[VIVIER, 1973] VIVIER O. - *Varèse*, Éditions du seuil, Paris 1973

[WIEDL-ACHILLES, 1990] WIEDL-ACHILLES S. - *Neue Musik und Tonband. Über Funktion und Einfluß der Magnetbandaufzeichnung in der musikalischen Komposition*, Pfau-Verlag, Saarbrücken, 1990.

[WINSTON & HORN, 1989] WINSTON P. H., HORN B.K.P. — *LISP*, Addison Wesley, Reading, Mass, 1989.

[XENAKIS, 1971] XENAKIS I. - *Formalized Music*, Pendragon Press, Stuyvesant, 1971.

[XENAKIS, 1981] XENAKIS I. - *Musiques Formelles*, Stock Musique, Paris, 1981.

5.2 Quelques références Internet

American Music Center Home Page
http://www.ingress.com/amc/

American Music resource
http://www.uncg.edu/~flmccart/amrhome.html

Bibliothèque nationale de France
http://www.bnf.fr/

Bourges-IIME
http://www.gmeb.fr/

Bregman Studios at Dartmouth College
http://music.dartmouth.edu/

CNMAT
http://www.cnmat.berkeley.edu/

Computer Music Journal
http://mitpress.mit.edu/e-journals/computer-music-journal/

Computer music links on the WWW
http://cmp-rs.music.uiuc.edu/other/

DEGEM
http://www.kgw.tu-berlin.de/DegeM/

Electronic Music Foundation
http://www.emf.org

International Computer Music Association
http://coos.dartmouth.edu/~rsn/icma/icma.html

IRCAM
http://mediatheque.ircam.fr/internet/index.thm

Music Composition Resource
http://www.und.nodak.edu/dept/mcr/

SEAMUS On-Line
http://comp.music.lsu.edu/seamus/

SAN - membership form
http://www.demon.co.uk/sonicart/membership/member.html

Sonances
http://www.sonances.qc.ca/journals/music_f.htm

Sound and Music Research
http://www.bath.ac.uk/~masjpf/sound-research.html

Sonic Arts Network
http://www.demon.co.uk/sonicart/

Internationale Datenbank Elektroakustischer Musik
http://www.kgw.tu-berlin.de/EMDoku/Studios-E.html

William and Gayle Cook Music Library
http://www.music.indiana.edu/music_resources/mcology.html

Worldwide Internet Music Resources
http:// www.music.indiana.edu/music_resources/journals.html

6. Index

accelerando.....24
additive 31,58,100
aléatoire.....16,17,102,103,104,107,141
Antheil G.....12
Antiphonie 30
Apollinaire G.....9
Assayag G.....61,63,122,127
AudioSculpt 61,62,63,66,67,69,73,76,83,93,97,98,100,101,102,127,143
Ballet Mécanique.....12
band filter.....71,83,85,87,89,90
bande 3,16,17,21,22,23,27,29,30,36,43,49,50,51,53,54,71,84,85,86,87,89,96,97,98,99,101,106,107,108,109,110,111,112,113,114,140,141
Barbaud P.....44
Barron L. et B.....16
Bauhaus.....12
Bell Telephone Laboratories.....29
Berio L.....38,39
Beyer R.....30
bidule en ut.....26
Bonnet A.....63
boucle.....23
Boulez P.....30,45,123
breakpoint filter.....72,87,92,94,112
bruit blanc.....36,71,92,98,99,100,106,141
bruits 3,5,7,8,9,10,11,12,13,18,19,20,21,22,24,26,28,36,61,64,106,132
Buchla D.....42
Busoni F.....31
Cage J.....14,15,16,17,18,25,29,123,124,130
Cahill T.....7,31
CAO.....62,64,105,109
Chant 8,36,45,53,81,82,130
ChordSeq.....75,84
Cinq pièces op. 16 33
Claudel P.....19
Club d'Essai.....19
cluster.....14
Come out.....23
CommonLisp.....61,73
CommonMusic-Stella.....63
concert de locomotives.....24
contrepoint 24
Cowell H.....14
Crime.....45
Cros C.....7
CSound 35,44,63,81
Cursus de composition et informatique musicale 106,114
Diamorphoses.....43
dilatation/compression.....70,101,102,103,104,106
Diphone.....100
Dirks P.....51
Doerlemann E.....28
Dudley H.....29
Dynamophone.....31
échantillonneur.....15
Edison T.....7
Eimert H.....28,29,30,39,101,128
Elektronisches Musikprojekt.....39,145
Emmerson S.....41,126,127,132
Empreintes.....97
Entwurf einer neuen Ästhetik der Tonkunst.....31,124
Epitaph für Aikichi Kuboyama.....39,101
Esprit des Dunes.....63
Esquisse.....31,37,45
Essay 34,35
Étude 1.....30
Étude 2.....30
Etude aux Chemins de fer.....19,25
Étude aux tourniquets.....24
Étude concrète.....30
Etudes Transcendentales 81
Evangelisti F.....30
Ferneyhough B.....81,83
Ferrari L.....37
fibonacci.....102
filtrage 62,83,84,86,87,88,89,90,91,92,94,95,98,100,101,106,108,109,110,112,141
filtre.....29,42,83,106
Fineberg J.....61,97
Fischinger O.....13
Formes.....45,53,131
Fourier J.....32,65,125
frequency bins.....65,67,71
fund-trans.....79
futuriste.....9,11,19,21,28,130
Fux J.J.....43
Georgaki A.....51
Gesang der Jünglinge.....8,36,39
glissando...54,56,57,58,76,109,116,117,118,140,142

Goeyvaerts K.....30,33,132
Gredinger P.....30
Grisey G.....63
Gropius W.....12
Hambreaeus B.....30
Hartmann 29
Harvey J.....47,51,52,53,54,55,56,57,58,59,125,140
Helmholtz H.v.....32
Henry P.....14,26,30,36
Hiller L.A.....43
Hymnen 36
I'm sitting in a room.....40
IChing.....17
Imaginary Landscape No. 1.....15
Imaginary Landscape No. 4.....15
intonarumori.....11,74
Ionisation.....13
IRCAM
35,45,47,51,61,62,63,66,97,100,122,123,126,127,128,129,131
Isaacson L.M.....43
jitter.....81
Klangfarbenmelodie.....33
Klebe G.....30
Koenig G.M.....30,34,35,44
Kontakte 36
Kontrapunkte.....47
Krenek E.....38
Laban-Tanz-Gruppe.....28
Laurson M.....45
Le voile d'Orphée.....26
Lehre von den Tonempfindungen.....32,127
leitmotiv.....26
les ondes Martenot 7
Lindberg M.....61,63
Living Room Music.....14
Lucier A.....40
Maderna B.....38
magnétophone.....7,13,16,21,22,30,32,40,53,74
Marimbaphase.....23
marqueurs.....68,93,94
Martenot M.....7
Mayer-Eppler W.....34
Menezes F.....35
Mersenne M.....31
Messiaen O.....30
mesure.....8,15,22,24,65,107
Meyer-Eppler W.....29
micromontage.....22
microphone.....19,40
MIDI.....74,75,84
MidiCents.....75
Modulations.....64
Moholy Nagy L.....12
Moles A.....36
Mortuos Plango, Vivos Voco 47,51,125,127,140
Murail T.....61,63
Music festival for two prepared pianos.....14
MUSIC V.....53
Musikalisches Nachtprogramm.....28
musique concrète....5,8,12,18,19,26,27,32,36,37,132
musique électronique
.....5,8,18,27,28,29,30,32,35,39,42,43,47,91,114
Nez K.....62,87,106,109,112,113,141
Nordwestdeutscher Rundfunk Köln.....28
Ohm G.S.....32
OpenMusic
.....46,54,61,62,63,73,74,75,107,122,140,143
ordinateur
3,4,7,8,17,35,42,43,44,45,61,62,63,65,103,122,123,126,129
Orphée'53 26
Palestrina.....43
partials-fbreakpoint 98
partiels
32,33,39,44,51,52,53,54,55,56,57,58,62,64,69,81,88,90,91,92,96,97,98,99,100,141
PatchWork.....45,61,122
Pauset B.....35
Pfingstoratorium.....39
phase vocoder.....39
phonogène.....21,22,74
phonogène à clavier.....21,30
phonographe.....7,9,22
piano préparé.....14,15
Pianophase.....23
Piati U.....11
Pins de Rome 12
Pousseur H.....30
Pratella F.B.....9
PreFORM.....45
Project 1.....44
Project 2.....44
Project of Music for Magnetic Tape 16
PWConstraints.....63
radio.....15,19,20,24,26,28,29
Reich S.....23
repmus 63
Repons 45
Respighi O.....12
retro-coda.....114,115
Risset C.....44,124
Rüfer R.....38,39
Russolo L.....9,10,11,21
Ruttmann W.....12
Schaeffer P.
8,12,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,30,36,37,38,41,123,125,126,131

Schönberg A.....33
Sculpted Implotion.....106,141
séquenceur.....42
Sieben Stufen.....114,142
sillon fermé.....22,23,27
SIRIUS.....42
Situation.....31,63,132,133
Situation des Handwerks.....31,132
Smalley D.....41
solfège.....19,37
Solfège de l'objet sonore.....37,132
solo.....24
Sonologie.....44
sons à l'envers.....23
sons amputés.....22
SoundHack.....100
spectre à court terme.....65,66,67,69,70,71,117
spectrographe.....32
spectro-morphologie.....41
Stockhausen K.
8,13,14,15,29,30,31,33,34,35,36,38,39,42,47,48,
49,50,58,59,127,132,133
stretch-dyn-exact.....103,104
Stroppa M.....63
Studie 1.....33,34,47
Studie 2.....34,35,39
Studio d'Essay.....19
Suite Illiac.....43
SuperCollider.....63
support.....3,7,12,13,15,19,22,25,41,47,53,61,70,77
symphonie des bruits.....20,24
Symphonie pour un homme seul.....26
synthèse croisée source-filtre.....98
synthèse granulaire.....17
synthétiseur.....7,42
Taube R.....63
Technische Universität Berlin.....38
Telemusik.....36
Telharmonium.....7,31
Termen L.....7
Thema, Omaggio a Joyce.....38,39
thereminvox.....7
tourne-disque.....7,15
Traité des objets musicaux.....37,132
Trakl G.....114
transposer.....21,30,45,53,70,74,95
transposition
21,22,25,27,53,55,61,62,70,73,74,75,76,77,78,7
9,83,90,95,96,101,106,114,115,116,118,141,142
Trautonium.....7
Trautwein F.....7
Tudor D.....16
tutti.....24
Varèse E.....13,123,133
Vertov D.....11
vibrato.....56,57,80,81,82,83,140
Visage.....38,124
Vocalises.....30
vocodeur.....29,32,45,55,62,65,66,70,71,74,101
voltage control.....8,42
Webern A.....33
Westdeutscher Rundfunk Köln.....28
Williams Mix.....16,17,25
Williams P.....16
Winckel F.....38
Wochenende.....12
Xenakis I.....43,44,132
Zeitregler.....39,101

7. Annexe 1 — CDRom des exemples sonores

Le CDRom comporte deux parties : une partie audio, à écouter avec un lecteur CD, et une partie informatique (format Macintosh). La partie audio contient les exemples sonores des analyses et traitements décrits dans notre recherche. Les numéros indiqués correspondent aux plages du CD. La partie informatique inclut la bibliothèque « OM-AS » pour le logiciel *OpenMusic*[148].

Analyse *Mortuos Plango, Vivos Voco* de Jonathan Harvey (voir partie 2)

_ 01 extrait de *Mortuos Plango, Vivos Voco* (minute 2.03 à 2.15)
_ 02 syllabe chantée /pra/
_ 03 premier glissando de synthèse
_ 04 syllabe chantée /pra/ et premier glissando de synthèse
_ 05 deuxième glissando de synthèse
_ 06 premier et deuxième glissando de synthèse
_ 07 son de cloche, marquant le début de la troisième section de la composition *Mortuos Plango, Vivos Voco*
_ 08 deuxième glissando de synthèse et son de cloche
_ 09 passage complet de la syllabe /pra/ au son de cloche

Exemples sonores illustrant les fonctions de la bibliothèque « OM-AS » (voir partie 2)

_ 10 son de flûte
_ 11 son de flûte tranposé par une gamme chromatique
_ 12 son de gong
_ 13 mélodie de flûte
_ 14 gong transposé par la mélodie jouée à la flûte dans l'exemple 4
_ 15 sons des exemples 04 et 05 joués ensemble
_ 16 son de l'exemple 04 dont l'évolution des hauteurs a été supprimé
_ 17 son de l'exemple 07 transposé par la gamme chromatique
_ 18 son sinusoïdal de 500 Hz
_ 19 son sinusoïdal de 500 Hz avec vibrato
_ 20 son du chant irlandais
_ 21 son du chant irlandais avec vibrato
_ 22 son du gong (exemple 12) ayant conservé une seule bande de fréquence; l'évolution du filtre suit une mélodie
_ 23 son du gong (exemple 12) ayant conservé plusieurs bandes de fréquence; l'évolution du filtre suit une mélodie

[148] Pour l'installation des librairies externes, se référer au manuel du logiciel *OpenMusic*.

_ 24 son du gong (exemple 12) avec plusieurs bandes de fréquence coupées; l’évolution du filtre suit une mélodie
_ 25 extrait de trompette (Miles Davis)
_ 26 son d‘applaudissement
_ 27 applaudissement filtré par l‘évolution de la fréquence fondamendale du son n°25
_ 28 son n°25 n’ayant conservé que les partiels pairs
_ 29 son n°25 n’ayant conservé que les partiels impairs
_ 30 bruit blanc filtré par un rythme
_ 31 mélodie jouée sur un marimbaphone
_ 32 dilatation d‘un mixage de séquences de flûte
_ 33 filtrage du son n° 32
_ 34 enregistrement des son n° 31 et n°33
_ 35 transposition du son n° 33 suivant l‘évolution de la fréquence fondamentale du marimbaphone
_ 36 enregistrement des son n° 31 et n°35
_ 37 courte séquence de piano
_ 38 bruit blanc filtré en conservant des bandes d‘une largeur de 30 Hertz dont les fréquences centrales correspondent aux fréquences des partiels du piano
_ 39 bruit blanc filtré en conservant des bandes d‘une largeur de 200 Hertz dont les fréquences centrales correspondent aux fréquences des partiels du piano
_ 40 bruit blanc filtré en coupant des bandes d‘une largeur de 100 Hertz dont les fréquences centrales correspondent aux fréquences des partiels du piano
_ 41 séquence de piano filtrée en coupant des bandes d‘une largeur de 100 Hertz dont les fréquences centrales correspondent aux fréquences des partiels du piano
_ 42 enregistrement des sons n° 37 et n°41
_ 43 un exemple de dilatation/compresseion aléatoire de la mélodie jouée sur le marimbaphone (exemple 31)
_ 44 un autre exemple de dilatation/compresseion aléatoire de la mélodie jouée sur le marimbaphone (exemple n° 31)
_ 45 mixage de huit résultats de dilatation/compresseion aléatoire
_ 46 enregistrement des sons n° 31 et n°45

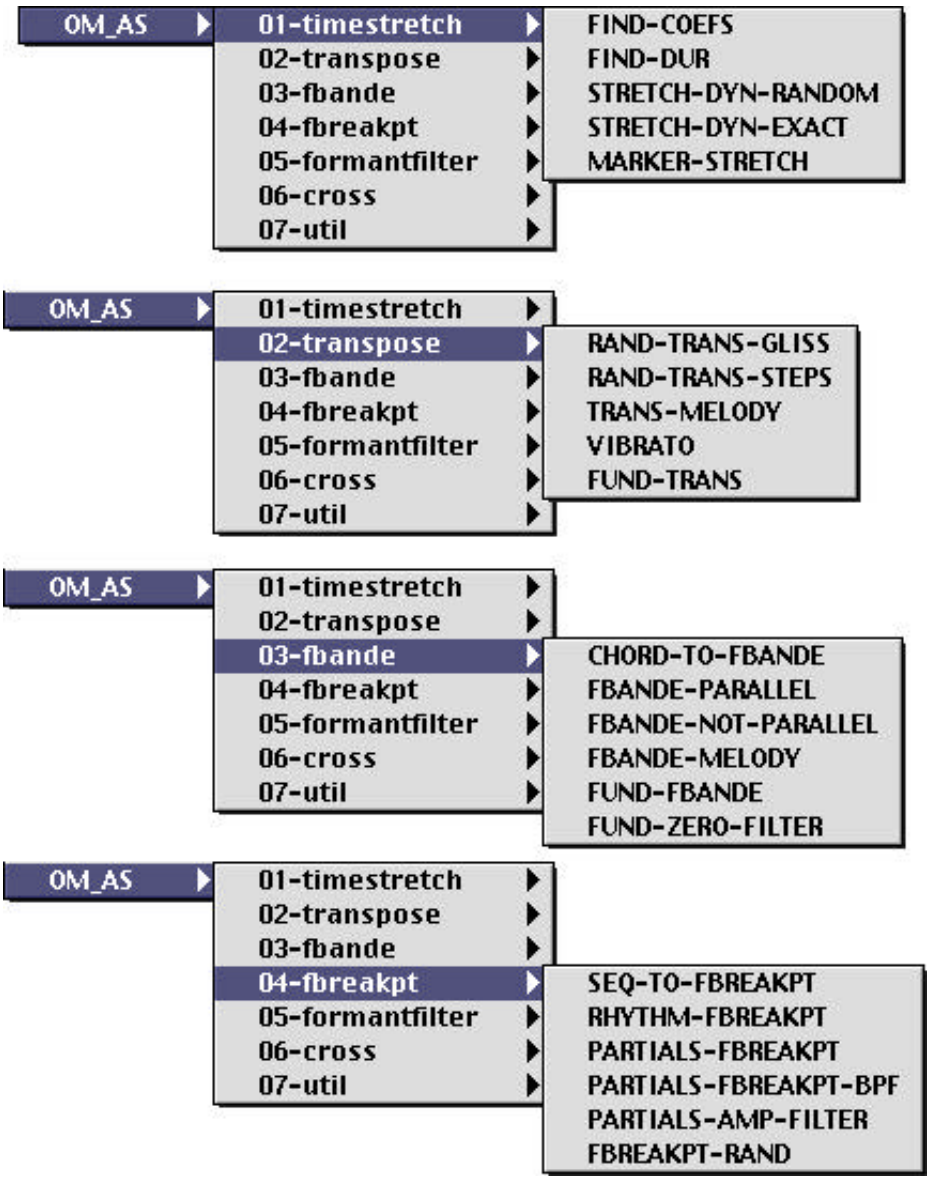
Analyse *Sculpted Implotion* de Ketty Nez (voir partie 3)

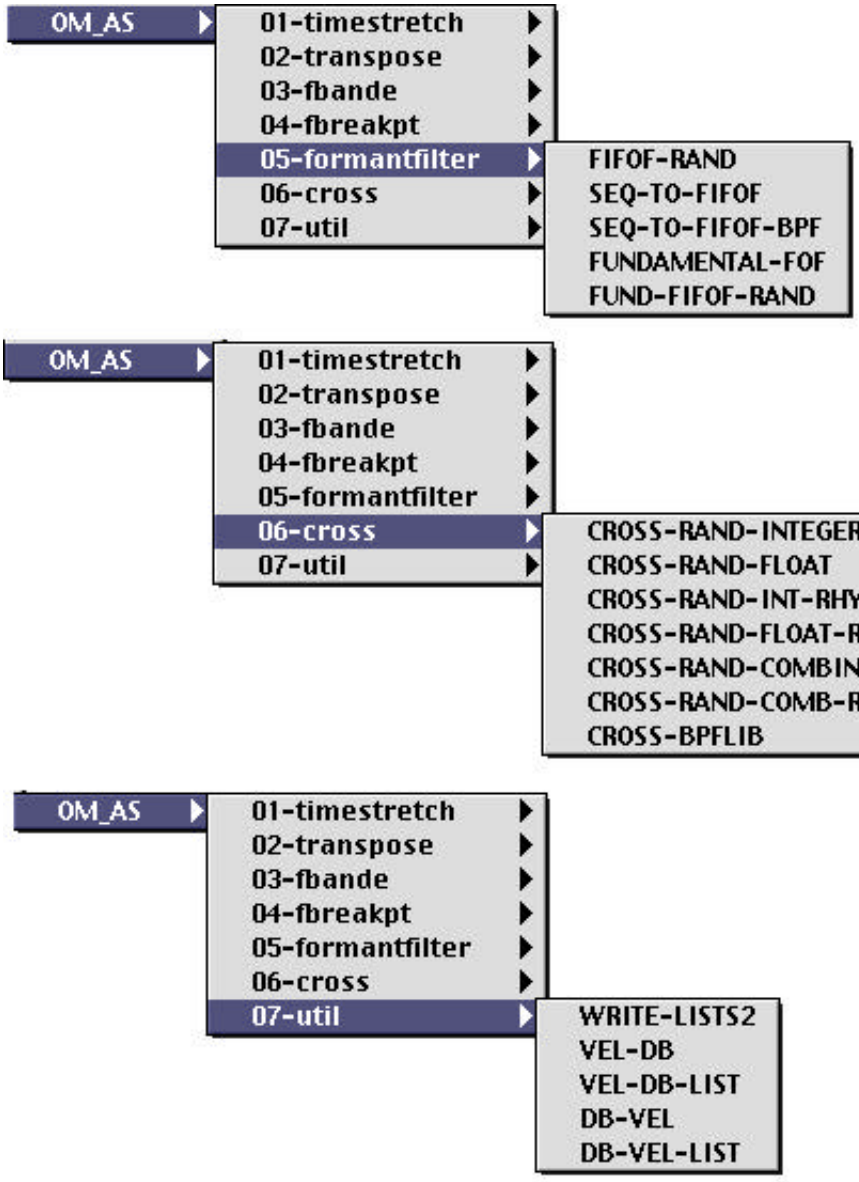
_ 47 mixage des sons de la pluie et de la mer
_ 48 filtrage du son n° 47
_ 49 mixage des sons d‘une fontaine et d‘une brosse à dents
_ 50 filtrage du son n° 49 avec une largeur de bande de 150 Hertz
_ 51 filtrage du son n° 49 avec une largeur de bande de 3 Hertz
_ 52 filtrage du son n° 49 avec une largeur de bande de 3 Hertz (mélodie en arpège)
_ 53 mixage final des exemples 49 à 52

Analyse *Sieben Stufen* de Hans Tutschku (voir partie 3)

_ 54 enregistrement du mot *Verfall* sur les sept notes de l‘accord « allemand »
_ 55 enregistrement du mot *ruine* sur les sept notes de l‘accord « français »
_ 56 dilatation du mot *ruine* sur 15 secondes
_ 57 transposition (glissando) du son n° 56
_ 58 mixage des sept glissandi du mot *ruine*
_ 59 mixage des sept glissandi du mot *Verfall*
_ 60 resynthèse du mixage des sept glissandi du mot *ruine*
_ 61 resynthèse du mixage des sept glissandi du mot *Verfall*
_ 62 extrait de la pièce (septième partie)
_ 63 glissando du mot *Glocken* dans la sixième partie
_ 64 dilatation du son n° 63 sur deux minutes
_ 65 synthèse croisée entre le son n° 64 et l‘enregistrement du poème

8. Annexe 2 — Liste complète des fonctions de la bibliothèque « OpenMusic - AudioSculpt »




OM_AS
01-timestretch
02-transpose
03-fbande
04-fbreakpt
05-formantfilter
06-cross
07-util
FIFOF-RAND
SEQ-TO-FIFOF
SEQ-TO-FIFOF-BPF
FUNDAMENTAL-FOF
FUND-FIFOF-RAND
OM_AS
01-timestretch
02-transpose
03-fbande
04-fbreakpt
05-formantfilter
06-cross
07-util
CROSS-RAND-INTEGER
CROSS-RAND-FLOAT
CROSS-RAND-INT-RHYTHM
CROSS-RAND-FLOAT-RHYTHM
CROSS-RAND-COMBINATIONS
CROSS-RAND-COMB-RHYTHM
CROSS-BPFLIB
OM_AS
01-timestretch
02-transpose
03-fbande
04-fbreakpt
05-formantfilter
06-cross
07-util
WRITE-LISTS2
VEL-DB
VEL-DB-LIST
DB-VEL
DB-VEL-LIST

9. Traduction de : Julia Gerlach - « Aus der Ferne : Ernst Kreneks Elektronisches Musikprojekt » « Venu de loin : le Projet Musical électronique d'Ernst Krenek »

In : *Musik…, verwandelt. Das Elektronische Studio der TU Berlin 1953-1995*, Wolke, Berlin, 1996, pp. 73-83.

Circonstances de création

A la recherche d'indices

Au début des années soixante, le travail musical commence à s'intensifier au Studio Electronique de la *Technische Universität (TU)* à Berlin. C'est ainsi qu'y sont réalisées en 1962 outre quelques pièces du "compositeur-maison" Boris Blacher, une partition du compositeur en exil Ernst Krenek. Quand et comment un contact personnel a été établi avec Berlin est un point qu'il n'est plus possible de reconstituer exactement. Le Professeur Fritz Winckel et Ernst Krenek se sont cependant rencontrés au plus tard en 1961 à l'occasion d'une conférence sur la musique électronique[149], mais il est très vraisemblable qu'ils se connaissaient déjà, puisque la partition de Krenek indique 1960 comme date de début de la pièce *Elektronischen Musik.*[150]

L'ingénieur du son tout récemment engagé Rüdiger Rüfer est chargé à l'initiative de Winckel de la réalisation de la pièce — sans aucun échange direct avec le compositeur, car c'est par la poste que Krenek envoya depuis les Etats-Unis la partition et ses indications de réalisation. Bien que Rüfer ait eu fini dès 1962 la réalisation parfois vraiment ardue des pages de la partition envoyées, ce n'est que deux ans plus tard, lors de la "Semaine de la Musique Expérimentale" en 1964, qu'eut lieu la première exécution publique du fragment, sans que celle-ci cependant ne soit signalée comme une création. Une seconde exécution de la bande tout aussi confidentielle — présentée qui plus est dans une version modifiée très probablement non autorisée — eut lieu lors de la "Semaine Internationale de la Musique Expérimentale" en 1968[151].

Depuis, cette étude n'a été jouée en public que de façon sporadique, non sans raison, car cette pièce est restée à l'état de fragment et donne l'impression de ne pas être arrivée à maturité sur le plan sonore et compositionnel. Cependant, elle est la première pièce uniquement composée de sons purement électroniques à avoir été produite au Studio Electronique de la *TU* de Berlin. Qui

149"La musique sérielle est-elle écoutable?" (Table ronde avec Claus-Henning Bachmann, Ernst Krenek, Franz Willnauer, Fritz Winckel), *Melos 28* (1961), Cahier 7/8, pp 223-229.

150 En 1960/61, Ernst Krenek était en train d'effectuer un voyage d'un semestre à travers l'Europe.

151 Dans le programme officiel du festival, la pièce de Krenek est la seule à ne pas être mentionnée à la date du 9 octobre.

plus est, sa facture rappelle le style des Etudes sérielles composées dans les années cinquante au Studio de la WDR à Cologne, et illustre de ce fait la position singulière sur le plan esthétique de la production des compositeurs invités au Studio de Berlin.

Dans la liste des œuvres complètes internes du Studio Electronique, la pièce de Krenek est désignée par le titre "Etude Sérielle"[152]. Dans sa partition autographe, Krenek l'avait à l'origine intitulée "Script pour Musique Electronique", ou "Projet de Musique électronique", titres - convenables pour une esquisse — qui présentent de façon inhérente un caractère provisoire. Ils n'égalent pas dans cette mesure les noms souvent riches de signification que Krenek choisissait habituellement pour ses pièces achevées[153]. L'hypothèse que cette pièce est inachevée est confirmée par d'autres détails : sur la dernière page de la partition, une troisième section est annoncée par le chiffre 3 ; dans une liste interne de ses œuvres, le titre est doté de l'addition "Première partie".

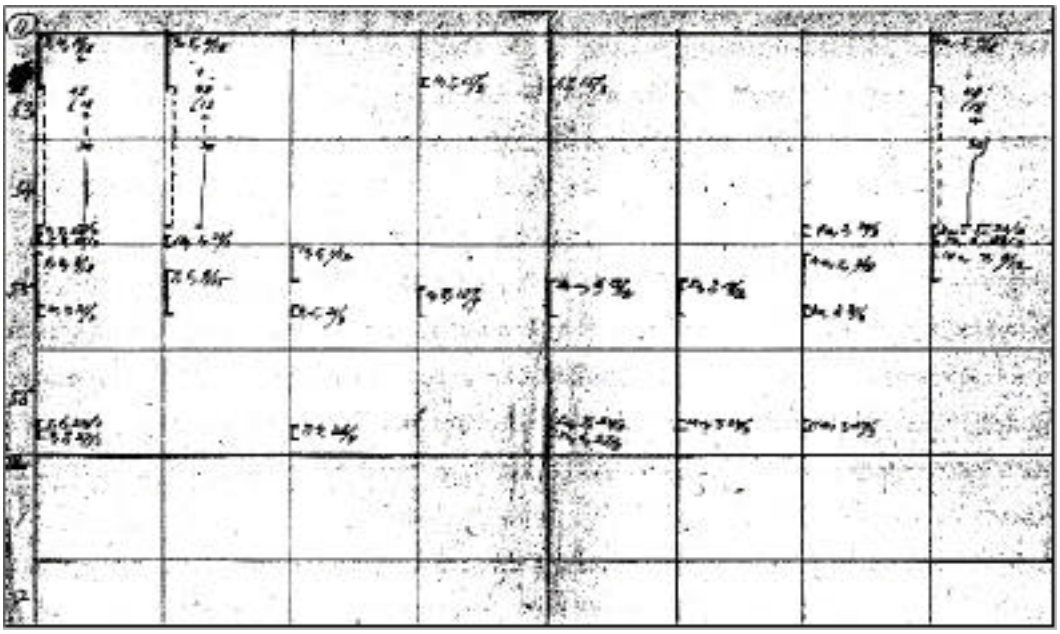
Dans la liste de ses œuvres établie par ses biographes, le "Projet de Musique électronique" développé par Krenek n'a pas trouvé sa place; à aucun endroit n'est mentionné un quelconque projet ou résultat compositionnel, ni encore moins ce contact avec le Studio Electronique de la *TU* de Berlin. On ne trouve pas le moindre renseignement dans l'article, pourtant minutieusement documenté par ailleurs, écrit par Rainer Wehinger sur les premières œuvres électroniques de Krenek[154]. De la même façon, on ne peut pas se reporter à un témoignage du compositeur lui-même pour éclaircir ces circonstances. Le "script" fait certes l'effet d'avoir été un document provisoire, mais ne donne cependant pas l'impression d'avoir été écrit à la va-vite. Il semble avoir été destiné à être une préparation pour une pièce plus importante dont l'achèvement n'a pas eu lieu du fait vraisemblablement d'une série de raisons qui vont maintenant être indiquées comme autant de possibles.

Elle apparaît cependant bel et bien sur un dépliant reprographié pour le concert - sans explication.

[152] D'après Rüdiger Rüfer, ce titre est dû à Fritz Winkel, mais nulle concertation avec Krenek n'est connue. Cependant ce titre est pertinant dans la mesure où la composition de cette pièce rentre dans la période sérielle de Krenek inspiré par son expérience avec la musique électroacoustique et son travail au studio de Cologne. Manifestement, cela aurait été exceptionnel que Krenek écrive *Musique Electronique*. Cela n'avait rien d'exceptionnel en ce qui concerne Winckel; à la différence de Krenek, la technique de composition avait pour lui une signification.

[153] Par exemple *La Corona, Horizons* circled ou *Sestina*.

[154] Reiner Wehninger : « …cela sonne comme si c'était un nouveau début », Ernst Krenek, (Studien zur Wertungsforschung 15), Wien, Graz, 1982, S. 189-201.



Ernst Krenek : « Elektronische Musik », dernière page de l'autographe « partition à l'axe temporelle ». On peut reconnaître à la fin le chiffre 3, qui indique au moins une autre partie prévue.

Arrière-plan biographique

Le compositeur autrichien Ernst Krenek, né en 1900, prit le chemin de l'exil en 1938, choisit définitivement la Californie comme pays d'élection en 1957, et refusa des offres telles que la direction de la *Hochschule für Musik* (Ecole Supérieure de Musique) de Berlin, que Boris Blacher accepta par la suite. Cependant, il se rendit souvent en Allemagne et en Autriche après la guerre et il participa entre autre aux Cours d'Eté de Darmstadt comme maître de conférence jusqu'en 1959, à intervalles légèrement irréguliers. C'est là qu'il rencontra en 1954 Herbert Eimert et Werner Meyer-Eppler. Ce contact déboucha finalement en 1955 sur un long séjour de Krenek au studio de Cologne, où il réalisa avec l'aide de l'ingénieur du son Heinz Schütz la première partie de sa pièce *Spiritus Intelligentiae Sanctus, Oratorio de Pentecôte,* conçue dès 1947. Ce « produit fini » provisoire fut créé le 30 mai 1956 avec le *Chant des Adolescents* de Karlheinz Stockhausen. Après que Krenek soit reparti aux Etats-Unis, sa pièce ne fut ni reprise ni terminée au studio de Cologne[155] — Krenek désormais passait pour un compositeur conservateur. Les compositeurs plus jeunes, l'avant-garde de Darmstadt, ce qui dans ce cas signifiait Luigi Nono, avaient la préférence en ce qui concernait l'attribution d'horaires de travail en studio et d'aide financière. Krenek reçut

[155] A la différence de la *Serielle Studie*, bien qu'inachevé, l' Oratorio de Pentecôte fut classé dans la liste des oeuvres de

une réponse négative même du studio de Milan. Sa biographie est le garant que Krenek prenait au sérieux la musique électronique comme nouveau champ de travail compositionnel, et qu'il avait définitivement développé des ambitions pour ce nouveau medium. Voici ainsi ce qu'écrit Claudia Zenck à son sujet :

"Il est vrai qu'il en vint à la technique sérielle via la musique électronique, mais ce n'est pas la curiosité intellectuelle qui le mena à l'électroacoustique … une expérience sensorielle élémentaire le poussa à se chercher lui-même dans ce nouveau medium."[156]

Le projet d'une œuvre électronique en collaboration avec le studio de la TU coïncida avec un tournant dans la vie de Krenek : après une phase d'indécision à propos de son éventuel retour en Europe, et des frictions avec une jeune génération de compositeurs qui commençait à se démarquer nettement de la génération des pères, des ouvertures pour travailler la musique électronique apparurent aussi soudain aux Etats-Unis. Krenek disposait alors à son domicile californien de son propre petit studio avec un synthétiseur Buchla avec lequel il finissait de réaliser ses propres pièces à bande. Des circonstances de cette période avant 1962, on peut au moins induire la source de la motivation profonde qui peut avoir conduit à accepter une proposition de collaboration avec le studio de la TU en dépit des nombreux problèmes qui résultaient de l'absence du compositeur sur le lieu de travail.

Composition à distance

Le studio électronique ne disposait alors absolument pas des moyens qui auraient pu permettre d'inviter Krenek à réaliser sa pièce à Berlin ; la situation financière de Krenek de la même façon ne lui permettait pas de longs séjours à l'étranger sans ressources propres[157]. La seule possibilité de collaboration se trouvait donc être un échange épistolaire. C'était une très mauvaise solution car Krenek n'était familier ni avec le style de travail en studio (il n'y en avait encore aucun à cette époque), ni avec l'ingénieur du son lui-même. Il n'y avait rien qui ressembla à un style

---

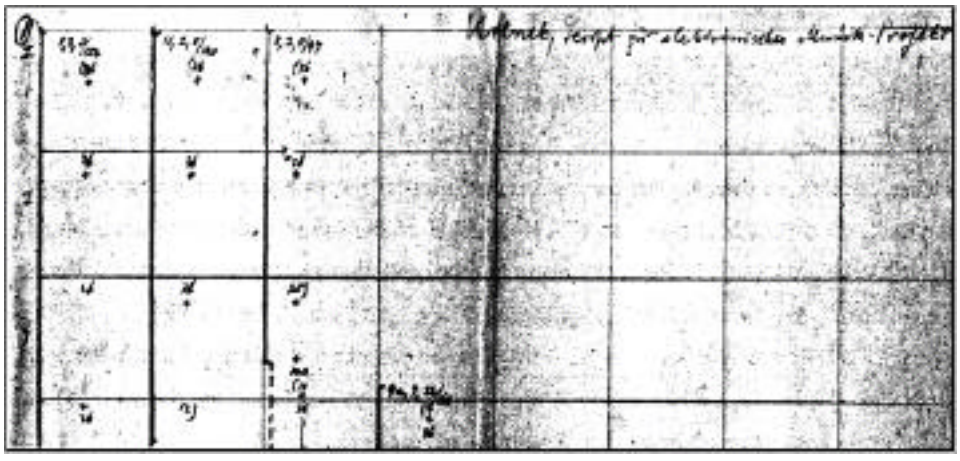
Krenenk comme une pièce indépendante.

156 Claudia Maurer Zenck : *Ernst Krenek - ein Komponist im Exil*, Wien, Lafite, 1980, p. 274.

157 Un séjour prévu par Krenek dans les studios de Milan et de Cologne avait déjà été annulé à cause de tels problèmes financiers. cf. Claudia Maurer Zenck (voir note 8) p. 275 et suivantes.

musical au studio de la TU, et il s'agissait du reste du premier contact du jeune Rüdiger Rüfer avec la musique électronique. Il n'y avait aucune standardisation en ce qui concernait la production sonore qui aurait pu garantir au compositeur une réalisation sonore de ses esquisses conforme à ses idées.

Quoi qu'il en soit, la technique compositionnelle de Krenek prit le chemin d'une composition réalisée à distance. Adossé aux méthodes de travail de la musique sérielle et de la génération sonore de synthèse habituelle au studio de la WDR de Cologne, il comprit les sons comme un conglomérat de paramètres à déterminer. Dans la perspective d'une autre méthode de composition telle celle de la "musique concrète" par exemple, qui débute avec pour matériel l'objet sonore, et qui déploie la forme temporelle et donc la pièce comme le résultat d'une écoute intensive pour et avec les sons, une telle coopération aurait été impensable. Rüfer relate qu'une rencontre avec Krenek eut lieu quelques années après l'achèvement de l'"Etude" (dans la mesure où celle-ci pouvait être présentée sous forme de partition). (Ce fait ressort également d'un échange épistolaire entre Winckel et Krenek). A cette occasion, la bande fut jouée au compositeur qui, d'après Rüfer, eut en principe une réaction favorable, même si manifestement il ne pouvait pas s'identifier avec l'œuvre.



Ernst Krenek : *Elektronische Musik.* L'axe du temps doit être lu de haut en bas. Cette partition à l'axe temporel (c'est le début qui est reproduit) représente graphiquement les durées des sons isolés par des lignes de différentes longueurs. Les durées sont en outre représentées par des chiffres, de même que les

hauteurs sonores et les octaviations. Le son dans la première colonne est d'après le tableau de Krenek un « do 1 » qui dure 152*0.03 (= 4.56) secondes.

La "musique électronique" : notation et réalisation

Matériel autographe

Dans les archives du studio électronique, on trouve deux autographes de *Musique Electronique*, pour lesquels Krenek a choisi des modes de représentation très différents pour les mêmes enchaînements sonores. C'est une partition organisée autour d'une ligne temporelle qui a tout d'abord été développée. Elle tient compte au moins de façon théorique de certaines possibilités de la musique électroacoustique qui ne peuvent pas être notées avec la notation européenne traditionnelle. D'une façon étonnante, à l'encontre de ce qui se fait habituellement dans les représentations graphiques, l'axe temporel est placé à la verticale, si bien que ce ne sont pas les indications temporelles qui servent d'unités de mesure mais des carrés de 36 mm de côté, qui peuvent quoiqu'il en soit être transformés en valeur temporelles. Huit colonnes destinées à la voix sont rangées parallèlement côte à côte, la durée des sons individuels est indiquée à l'aide de lignes transversales. La réverbération (Krenek écrit : "Echo") est signalée par des lignes hachurées. Dans chaque colonne, un son au plus est noté si bien qu'il en résulte une épaisseur sonore maximale de huit sons sonnant en même temps.

"Dans les deux extraits (I et II) ici présentés, 1 mm signifie 0.03 seconde (en fait, 0.03/25 sec.). L'ensemble de la pièce est découpé en segments de chacun 36 mm. La durée de chaque son est représentée par une fraction de type m/n, sachant que m fait référence au chiffre de 0.03 seconde par unité suivant lequel le son apparaît (au début du segment à chaque fois de 36 mm), et que n est le chiffre de 0.03 seconde par unité, durée du son. Lorsque n est plus élevé que le chiffre des unités de 0.03 seconde disponible à l'intérieur du segment concerné, le temps est exprimée entre parenthèses divisée par le nombre des unités restantes et le nombre des unités necessaires dans le(s) prochain(s) segment(s). Lorsqu'un son est suivi d'une réverbération, il est alors représenté par une ligne brisée."[158]

Il ne s'agit donc en rien d'une technique de notation entièrement graphique : les paramètres concernant les sons isolés sont indiqués par des valeurs numériques. Krenek explique dans le texte d'accompagnement de la partition que *"chaque son… est caractérisé par 6 chiffres"* :

"Ceux-ci signifient : hauteur, octave, durée, enveloppe, couleur sonore, intensité

[158] Ernst Krenek : *Elektronische Projekt. Instruktionen.* La partition à l'axe temporelle autographe accompagnée

sonore. Pour l'instant, seuls les trois premiers sont donnés…"[159]

Ce qui signifie que sur cette partition, la couleur sonore, la dynamique et l'enveloppe manquent encore, mais devraient être fournies plus tard, ce qui bien sûr sous cette forme de valeurs numériques n'arriva jamais, chose fort compréhensible car, mis à part la difficulté de représenter la couleur sonore par une unique valeur, les paramètres restants ne sont pas des paramètres indépendants pouvant tout simplement être combinés, à la différence des trois premiers. Il faut prêter attention aux interactions. Il s'agit en outre de paramètres qui ne sont normalement pas statiques, mais qui sont sous-tendus par une évolution sonore. Logiquement, Krenek avait pris conscience de ce problème et en avait tiré la conséquence que ce projet de "détermination totale" devait être limité aux trois premiers paramètres et qu'il fallait choisir une autre notation — à savoir, la traditionnelle portée à cinq lignes — pour la partie d'une minute déjà composée. De cette façon, il ne saisissait les paramètres restants certes que de façon imprécise, mais en restant quoiqu'il en soit dans une proximité utilisable — à l'exception de l'enveloppe de l'amplitude pour laquelle il n'existe aucun symbole dans l'écriture musicale traditionnelle.

La seconde partition — complétée par un tableau de fréquences — fut le modèle de la réalisation de Rüfer. La dynamique et la couleur sonore sont représentées par des symboles laissant une marge d'interprétation à l'ingénieur du son. L'amplitude des sons individuels n'est pas notée de façon exacte ; les développements et contrastes dynamiques sont davantage indiqués comme dans le cas de la musique instrumentale avec les signes habituels *piano, forte* etc. ainsi qu'avec des indications de *crescendo*. La couleur sonore est indiquée ou par allusion à des couleurs instrumentales (*à la façon d'une guitare, d'un trombone*) ou par des adjectifs spécifiques tels que *sec, mince, gargouillant, coupant, doux*. Des groupes de sons semblables au niveau sonore sont réunis par des cercles colorés. Il résulte de ces parentés sonores d'une part des lignes contrapuntiques, qui peuvent contenir également des agglomérats de sons, et d'autre part, des champs sonores distincts qui structurent l'impression auditive.

La réalisation de Rüdiger Rüfer

La structuration sonore parfois très claire n'est pas uniquement le résultat des indications de Krenek, qui demande des contrastes sonores tels *percussif-legato, trompette-cloche, gargouillant-coupant.* De plus, Rüfer se rendit compte du danger que la reproduction mono ne

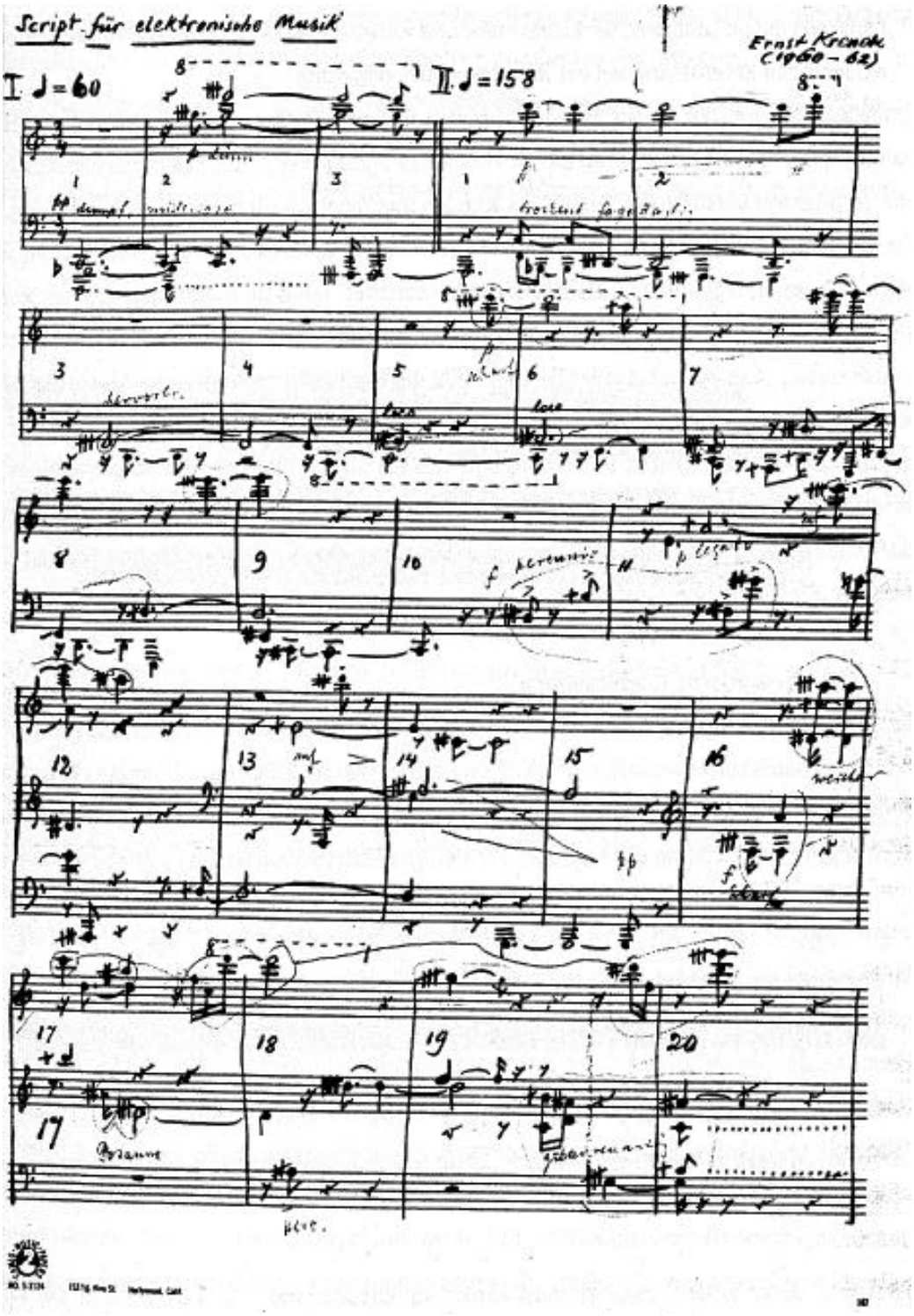
d'explications pour la notation.

rende des événements sonores peu claires du fait de son effet de masquage. C'est pourquoi il essaya *"de créer des couleurs caractéristiques en faisant des limitations diverses"*[160]. Comme il le décrit lui-même, la réalisation de certaines des couleurs sonores exigées se révéla être vraiment problématique :

« La réalisation purement électronique des sons de cloches était difficile car les durées souhaitées sont assez courtes. Il n'y a pas de vraies cloches dont le son est amorti aussi rapidement — le caractère de cloches se perd facilement si l'on coupe la résonance. »[161]

159 idem.

160 Rüdiger Rüfer : « Bemerkungen zur elektronischen Komposition von Ernst Krenek », description de la réalisation manuscripte, p. 2.

161 idem.

Ernst Krenek : *Elektronische Musik.* Dans cette partition autographe, la pièce est représentée en notation traditionnelle. Les cercles (en couleur dans l'original) représentent d'après les instructions la similitude sonore.

Pour la synthèse des timbres, Rüfer possédait un "générateur d'harmoniques"

(*Oberwellengenerator*)[162] qui avait été construit dans le cadre d'un stage et avec lequel, d'après Manfred Krause, seul Rüdiger Rüfer devait avoir travaillé de façon professionnelle.

"J'ai fait cette pièce avec un générateur avec lequel je pouvais mélanger onze générateurs de sinus. Et maintenant, la trompette… dans ce cas, je pris beaucoup de partiels et je fus déçu par le résultat : ce n'était naturellement pas une trompette. Mais cela m'apprit combien de partiels appartiennent à une trompette et qu'avec onze — ce n'est même pas la peine de commencer."[163]

Concernant le timbre, un problème fondamental de cette étude sérielle apparaît clairement : les descriptions des timbres sont trop pauvres. A côté du problème de l'interprétation des idées, on trouve encore la difficulté à réaliser une représentation abstraite à l'aide des instruments disponibles.

" Les deux sons "gargouillants" exigés à la page 2 ont été fabriqués avec des sons sinusoïdaux légèrement déformés. Comme ces sons ont des valeurs de double-croches [noire à 158], il fallait choisir une fréquence de distorsion supérieure ou égale à 16 Hz. Pour pouvoir encore entendre la distorsion avec les valeurs courtes, la fréquece de la modulation ne devait pas être trop petite (de 40-60 Hz environ). Cependant, les hauteurs sonores requises ne peuvent être ainsi entendues que très imparfaitement."[164]

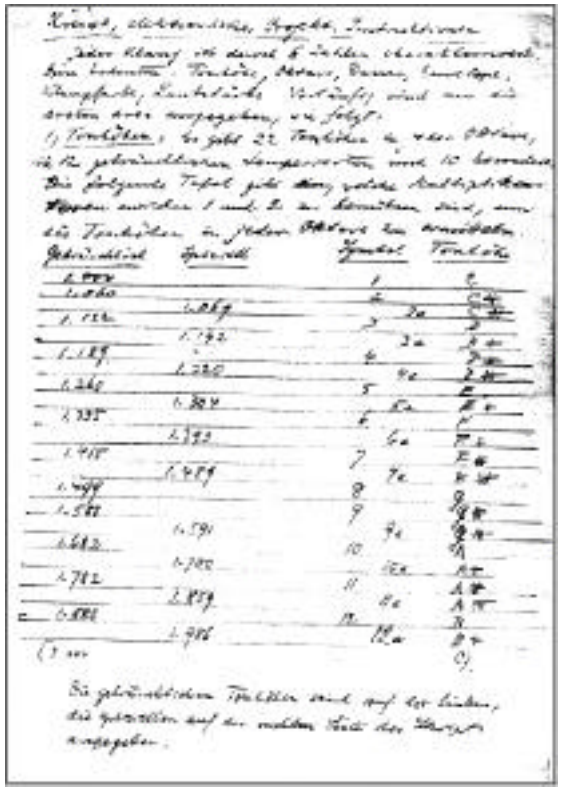
Le résultat quelque peu malheureux de la tentative faite pour atteindre un timbre "gargouillant" vient de la divergence entre l'évidence de l'idée et les représentation sonores qui y étaient liées d'une part et les limites des moyens de production techniques d'autre part. L'impossibilité d'atteindre le timbre imaginé est compensée par la tentative pour exécuter de façon particulièrement exacte les indications disponibles, ce qui va trop loin. Dans ce cas, le résultat sonore n'est pas un gargouillement qui se développe, mais une chaîne confuse de double-croche (distordues trop rapidement), qui n'avaient manifestement pas été souhaités ainsi par Krenek, et qui n'étaient pas non plus satisfaisant pour Rüfer. Il aurait été nécessaire dans de tels cas que compositeur et ingénieur du son cherchent ensemble de nouvelles solutions.

Une particularité sonore supplémentaire et un obstacle à la réalisation dans le même temps tient dans la réverbération indiquée par Krenek, dont la durée est indiquée exactement. L'expérience de Krenek avec la réverbération lui venait de son séjour au studio de la WDR. En 1956, il s'exprima de la façon suivante dans un article :

"Une réverbération naturelle et vraiment spatiale s'obtient en envoyant le son dans la chambre d'écho. C'est une pièce vide tout à fait ordinaire avec un écho très prononcé. Là, le son est

[162] Cet apareil n'a été utilisé que pour l'étude de Krenek, d'après les informations dont nous disposons.
[163] Interview de Rüdiger Rüfer avec Wedemark, 14 septembre 1991.
[164] Rüdiger Rüfer, voir note 12.

diffusé par un haut-parleur et est à nouveau capté avec les réverbérations de la pièce par un microphone en vis-à-vis."[165]



Ernst Krenek : *Elektronische Musik.* Instruction pour la partition à l'axe temporelle avec une explication à propos du systeme des hauteurs sonores formé de douze tons « habituelles » et dix « particuliers ».

C'est à peu près à cette époque que Stockhausen réalisa son *Studie II* (Seconde Etude), dont tous les sons étaient passés par la chambre d'écho. Krenek s'attacha à ce processus dans *Musique Electronique* ; la technique s'était du reste améliorée, des plaques de réverbération réglables étaient maintenant disponibles.

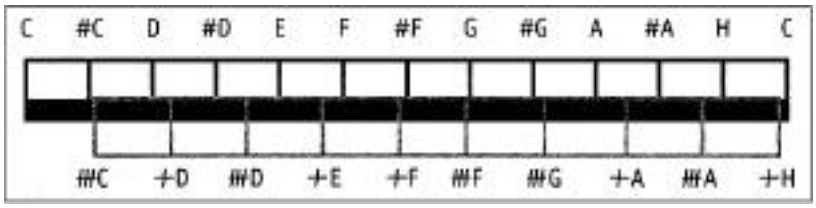
Puisque tous les sons ne devaient pas être réverbérés de la même façon, mais devaient se perdre lentement les uns après les autres ou parfois être superposés en agglomérats, il était nécessaire pour Rüfer d'enregistrer et de réverbérer chaque son séparément. Le processus de travail adopté fut donc logiquement le suivant : chaque son devait tout d'abord être prolongé à l'aide

[165]Ernst Krenek : "Qu'est-ce que la musique électronique et comment prend elle-naissance?" (1956). Réimprimé dans : *Im Zweifelsfalle, Aufsätze zur Musik*, Europaverlag, 1984, pp. 198-207, ici p. 202.

d’une plaque de réverbération, puis ces sons isolés devaient être enregistrés presque voix par voix pour finalement être ensuite synchronisés sur une autre bande. Il n’est pas nécessaire de souligner explicitement que cette méthode de travail fut compliquée et longue. Il est clair à ce point que l’idée que se faisait Krenek du studio électronique ne correspondait pas à la réalité du studio berlinois des années soixante.

Quelques réflexions analytiques

Outre *Quintona*, réalisée aux Etats-Unis en 1965, *Musique Electronique* est la seule œuvre à avoir été conçue comme une pièce uniquement pour bande seule[166]. Krenek a construit cette pièce sur un système sonore de 22 sons qui, de façon assez étonnante, n’est pas fait de 22 intervalles égaux, mais d’une combinaison d’une échelle chromatique tempérée normale avec une échelle de dix sons dont les intervalles sont égaux à deux exceptions près[167]. Des intervalles très differents naissent donc de la combinaison de ces deux échelles. Pour cette raison, Krenek a donné la fréquence de chaque hauteur sonore quelle que soit l’octave dans laquelle celle-ci se trouve.



Dans le système de hauteurs sonores choisi par Krenek des intervalles très differents sont possibles. Certes, les deux champs de hauteurs sont en soit presque équidistants, la superposition cependant est irrégulière. Les demi-tons « do - do# » et « sol - sol# » sont conservés.

De nombreuses hauteurs sonores sont si proches, comme dans l’intervalle entre le sol trop aigu (268 Hz) et le do 3 (270 Hz), qu’elles peuvent à peine être distinguées lorsqu’elles sont entendues l’une après l’autre à nu. Un battement de 2 Hz se produit si elles apparaissent en même temps.[168] Cette idée de deux systèmes sonores superposés ayant pour conséquence des intervalles inégaux — réalisés sans problème avec les générateurs — ne semble pas cependant jouer un rôle

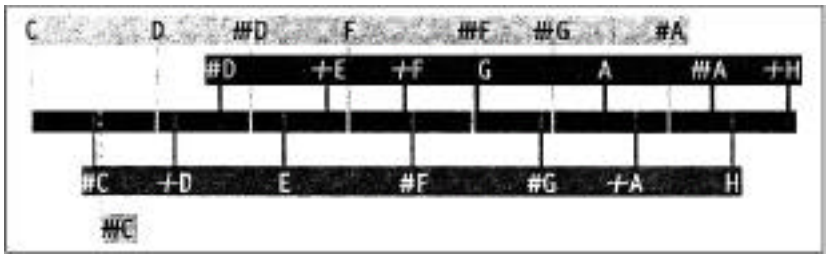
[166] D'après Rainer Wehinger, voir note 6.

[167] Dans une échelle de dix tons complètement équidistants, le son 6 tomberait sur le son 7 de l’échelle chromatique tempérée. Les deux demi-tons tempérés restent à distance d’une quinte (« do-do# » et « sol-sol# »), une relation qui du reste n’est pas mise en valeur dans la pièce.

[168] Rüfer fait état dans sa description de la réalisation d’un passage (mesure 20) dans lequel ce problème - probablement pas pévu par Krenek - est apparu.

structurel au cours de la réalisation compositionnelle qui s'en suit. Klaus Ebbeke, qui avait accès aux documents de Krenek, écrivit à propos de la méthode et de la technique compositionnelle de cette pièce :

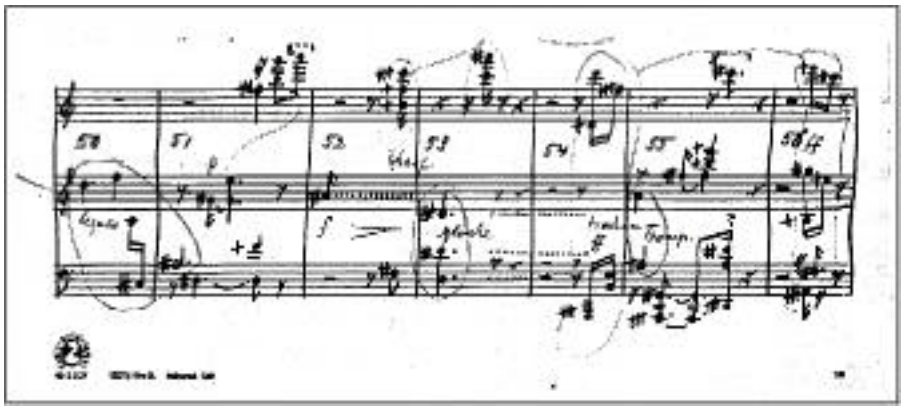
"Les esquisses montrent qu'il [Krenek] avait presque encore en tête des mesures, qu'il s'appuie sur la musique conventionnelle aussi bien pour ce qui est de la progression des hauteurs que de la progression rythmique, et que le résultat final ne sonne pas très différemment d'une composition pour orchestre qui aurait seulement été dotée de nouvelles couleurs."[169]



Ernst Krenek : *Elektronische Musik. Système sonore*. Krenek divise le champ sonore des 22 hauteurs en trois groupes. En général, une note sur trois appartient au même groupe sonore. Chaque groupe de hauteurs est formé de sept notes. La note « restante » apparaît dans la partition pour la première fois à la mesure 43, puis ensuite à deux autres endroits.

Une analyse de la partie disponible de la pièce montre que Krenek traite de la même façon les sons des deux échelles. Il ne les met pas en relation l'une avec l'autre, mais il les réunit dans un champ de hauteurs possibles dont les éléments sont régulièrement ordonnés selon trois champs sonores comprenant chacun sept sons. Au début, le premier champ sonore apparaît trois fois à la suite avec des changements d'octavation puis des sons appartenant aux autres champs sonores imprègnent de façon croissante le tissu harmonique.

Parallèlement à ce développement, une transformation progressive a lieu au niveau du tempo et du registre. La pièce commence par une opposition de registres extrême, entre d'une part un morne accord tenu pianissimo dans la région des basses fréquences (octave 0) et d'autre part deux sons faibles dans l'octave 7. Ce large écart entre les registres utilisés placé au début oriente toujours toute la pièce comme un élément structurel important, mais n'est jamais à un autre endroit si fortement contrasté. Le tempo lent des trois premières mesures (noire=60) leur confère un caractère d'introduction; la partie principale plus rapide est notée noire = 158.

[169]Klaus Ebbeke : *Zur Geschichte der elektronischen Musik*, Berlin, édition spéciale à l'occasion de *Inventionen '84*, 1984, p. 70

Ernst Krenek : *Elektronische Musik.* Dernière portée de la partition notée en notation traditionnelle. On voit clairement que la pièce n’a pas de conclusion ; elle s’arrête avec deux double-croches.

Dans la partie principale, le matériau auparavant bien structuré se mélange de plus en plus, un amollissement des extrêmes a lieu parallèlement à une densification temporelle. Les champs des hauteurs sonores sont mêlés de façon de plus en plus prononcée (il est rare que des champs harmoniques définis apparaissent lorsque des éléments d'un groupe sonore s'agglomèrent), les durées deviennent plus courtes et des paquets sonores animés surgissent. Les registres sont opposés de façon moins brutale, ils sont plutôt traversés par bonds plus petits. De ce déroulement sonore surgit à quelques endroits une ligne legato ou un autre événement clairement défini sur le plan sonore. En dépit de la structure polyphonique complexe à la base de cette pièce et malgré un matériau aux hauteurs sonores élargies, il en résulte une impression de transparence à l'écoute, avec une surface claire et même simple, qui est peut-être à porter au crédit de l'intervention éclairée, de la quasi-interprétation de Rüfer. Il a particulièrement travaillé à la structure et partant, au contraste des couleurs sonores. Celles-ci sont modelées selon la structure polyphonique et forment des groupements indépendants.

La pièce n'a pas de conclusion. Elle se termine sur deux rapides double-croches isolées qui ouvrent la section suivante qui n'a pas été écrite même si elle a été prévue. Ce fragment n'est donc pas clos; d'une durée de seulement 1.12 minute, il est en outre très court. Cela pourrait avoir été les raisons qui ont conduit Winckel à charger Rüfer de réaliser une version élargie - très vraisemblablement sans concertation avec Krenek. Dans ce but, une version quatre pistes fut tout d'abord produite à partir de la version mono, à l'aide de deux plaques de résonnance. Ensuite, deux répétitions complètes de l'ensemble du fragment furent ajoutées. D'après les indications de la partition, la première des deux fut dotée d'une réverbération supplémentaire; quant à la seconde, il s'agit d'une version jouée à l'envers. Dans cette dernière, les sons que Rüfer avait préparé pour la

première version en employant des morceaux de bande coupés en biseau aux attaques bien structurées, ainsi que les sons qui ont une réverbération, ne sonnent plus de façon très plausible quoiqu'il en soit, en particulier en ce qui concerne les sons qui d'après la partition doivent se perdre dans une réverbération et qui sont maintenant obscurcis par des anticipations diffuses.

Grâce à ces modifications, le fragment fut porté à la durée "concertable" de 3.36 minutes. Et finalement, un effet conclusif naquit de cette marche à l'écrevisse de la dernière partie: la pièce se termine maintenant dans un tempo lent avec des sons dansants dans la région des basses fréquences et des sons tranchants dans le registre aigu, au lieu de s'arrêter au milieu de son élan.